



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**KOSTEIKOT JA NIIDEN KYKY POISTAA
IBUPROFEENIA, KETOPROFEENIA JA
DIKLOFENAAKKIA KÄSITELTÄVISTÄ
JÄTEVESISTÄ**

Mira Vähkyrä

YMPÄRISTÖTEKNIikka

Kandidaatintyö

Huhtikuu 2020

TIIVISTELMÄ

Kosteikot ja niiden kyky poistaa ibuprofeenia, ketoprofeenia ja diklofenaakkia käsiteltävistä jätevesistä

Mira Vähkyrä

Oulun yliopisto, Prosessi- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2020, 31 s. + 3 liitettä

Työn ohjaaja yliopistolla: Heini Postila

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin kosteikkojen kykyä poistaa ibuprofeenia, ketoprofeenia ja diklofenaakkia käsiteltävistä jätevesistä. Työn tarkoituksena oli selvittää minkälaisiin tutkittavien aineiden puhdistustehokkuuksiin jätevesien kosteikkokäsittelyllä päästään. Lisäksi tutkittiin mitkä tekijät vaikuttavat kosteikon puhdistustehokkuuteen.

Työssä käytiin läpi kosteikon määritelmä ja sen ominaispiirteitä. Lisäksi perehdyttiin kosteikkoihin jätevesien puhdistajina sekä tekijöihin ja prosesseihin, jotka vaikuttavat puhdistustehokkuuteen. Niitä ovat esimerkiksi veden viipymäaika kosteikossa, lämpötila sekä kosteikkokasvillisuus. Työssä esiteltiin myös jätevesien laatua ja sen käsittelyn tavoitteita keskittyen lääkeaineisiin jätevesissä. Työssä tutkitut ibuprofeeni, ketoprofeeni ja diklofenaakki ovat yleisesti käytettyjä tulehduskipulääkkeitä.

Työssä tutkittavia puhdistustehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä olivat kosteikkoon tuleva lääkeaineen pitoisuus, lämpötila, kosteikon tyyppi sekä kosteikkokasvillisuus. Tarkastelun pohjana käytettiin kahdeksaa kosteikkotutkimusta, joiden tietoja taulukoitiin. Taulukoitujen tietojen pohjalta tutkittiin tekijöiden ja puhdistustehokkuuden suhdetta. Menetelminä käytettiin kuvaajia ja niihin lineaaristen regressiosuorien piirtämistä. Tutkimuksen tuloksina havaittiin, että kosteikkokäsittelyn puhdistustehokkuuteen positiivisesti suhteutuvia tekijöitä ovat korkea lämpötila ja kosteikkokasvillisuus sekä ketoprofeenilla ja diklofenaakilla korkea aineen pitoisuus. Eri kosteikkotyypeistä parhaita tuloksia saatiin kosteikkojen yhdistelmillä. Kosteikkokäsittely voi tarjota hyviä mahdollisuuksia jätevesissä olevien lääkeaineiden puhdistustehokkuuden parantamiseen.

Asiasanat: kosteikko, jäteveden käsittely, lääkeaineet

ABSTRACT

Wetlands and their ability to remove ibuprofen, ketoprofen and diclofenac from sewage

Mira Vähkyrä

University of Oulu, Degree Programme of Process and Environmental Engineering

Bachelor's thesis 2020, 31 pp. + 3 Appendixes

Supervisor at the university: Heini Postila

This bachelor's thesis studied wetlands' ability to remove ibuprofen, ketoprofen and diclofenac from sewage. The purpose of this thesis was to find out the removal efficiencies for each studied pharmaceutical by wetlands. It was also studied which parameters affect on removal efficiencies.

Thesis explained what a wetland's definition and its characteristics are. Thesis also introduced wetlands as sewage treatment and the parameters and processes that affect on removal efficiency, for example retention time, temperature and the presence of plants. Thesis also assessed sewage quality and sewage treatment's main purposes focusing on pharmaceuticals in sewage. The studied pharmaceuticals were ibuprofen, ketoprofen and diclofenac, which are commonly used nonsteroidal anti-inflammatory drugs.

The studied parameters possibly affecting on removal efficiency were pharmaceutical concentrations on sewage coming to wetland, temperature, the type of wetland and the type and presence of plants. As a base for this thesis there were eight wetland researches. The information of these researches were tabulated. The information tabulated was the base for studying how different parameters affect on removal efficiencies. Methods used were drawing graphs and linear regression lines. Positive correlations were observed between the highest removal efficiencies and high temperature or presence of plants or with ketoprofen and diclofenac high pharmaceutical concentration. When considering the type of wetland, best results appeared with combinations of wetlands. Wetland treatment can offer great possibilities to remove pharmaceuticals from sewage.

Keywords: wetland, sewage treatment, pharmaceuticals

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 Johdanto	5
2 Kosteikot	6
2.1 Kosteikon määritelmä ja kosteikkotyypit	6
2.2 Kosteikot jätevesien puhdistuksessa	7
2.3 Kosteikkojen puhdistustehokkuuteen vaikuttavat tekijät ja prosessit	9
3 Lääkeaineet puhdistettavissa jätevesissä	11
3.1 Jätevesien laatu ja vedenkäsittelyn tavoitteet	11
3.2 Lääkeaineet jätevesissä	12
4 Käytetyt menetelmät	14
4.1 Käytettyjen kosteikkotutkimusten perustiedot	14
4.2 Tutkimusten analysointiin käytetyt menetelmät	16
5 Kosteikkojen puhdistustehokkuus	17
5.1 Puhdistustulokset	17
5.2 Puhdistustulosten tarkastelu	24
6 Yhteenveto	26
LÄHDELUETTELO	28

LIITEET:

Liite 1. Ibuprofeenin puhdistustehokkuuteen liittyvät tiedot tarkastelluista kosteikkotutkimuksista.

Liite 2. Ketoprofeenin puhdistustehokkuuteen liittyvät tiedot tarkastelluista kosteikkotutkimuksista.

Liite 3. Diklofenaakin puhdistustehokkuuteen liittyvät tiedot tarkastelluista kosteikkotutkimuksista.

MERKINNÄT JA LYHENTEET

HSF	vaakasuuntainen maanpäällinen virtaus (horizontal surface flow)
HSSF	vaakasuuntainen maanalainen virtaus (horizontal subsurface flow)
P	lammikko (pond)
SF	maanpäällinen virtaus (surface flow)
SSF	maanalainen virtaus (subsurface flow)
VSF	pystysuuntainen maanpäällinen virtaus (vertical surface flow)
VSSF	pystysuuntainen maanalainen virtaus (vertical subsurface flow)

1 JOHDANTO

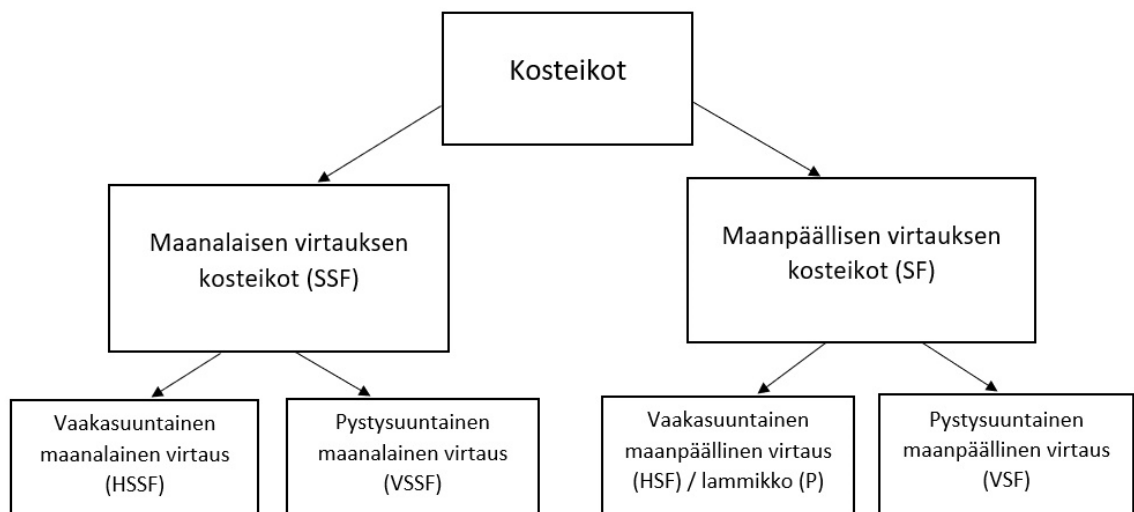
Jätevesien laatua ja puhdistusta on tarkkailtu ja kehitetty kauan. Pitkään esimerkiksi typpi ja fosfori ovat olleet erityisen huolenaiheena ja toimenpiteiden kohteena niiden ympäristövaikutusten vuoksi. (Puustinen ym. 2001) Nykyään on kuitenkin alettu kiinnittää entistä enemmän huomiota toisenlaisiin jätevesissä esiintyviin komponentteihin, kuten mikromuoveihin ja lääkeaineisiin. Niiden käyttäytyminen ja vaikutukset jätevedessä ja päätyessään sieltä ympäristöön ja jopa takaisin ihmisiin aiheuttavat monenlaisia haittoja. Lisäksi osa haittavaikutuksista on vielä tuntemattomia. (Suomen ympäristökeskus 2017) Tästä syystä jätevesien puhdistuksen merkitys ja tehokkuus kasvattavat tärkeyttään etenkin, kun saadaan enemmän tietoa jätevesistä kulkeutuvien aineiden haitoista. Lisäksi nykyaikana on entistä tärkeämpää kehittää vihreitä menetelmiä ja teknologioita aiempien menetelmien rinnalle. Kosteikkokäsittely on hyvä ekologinen menetelmä jätevesien puhdistamiseen (Kadlec & Wallace 2009).

Kandidaatintyössä tutkitaan kosteikkoja ja niiden kykyä poistaa jätevesistä yleisesti käytettäviä tulehduskipulääkkeitä ibuprofeenia, ketoprofeenia ja diklofenaakkia. Tarkasteltuja lääkeaineita, etenkin ibuprofeenia, päätyy jätevesiin ja perinteisiltä jätevedenpuhdistamoilta eteenpäin suuria määriä (Suomen ympäristökeskus 2017). Työn tavoitteena on selvittää, minkälaisia puhdistustuloksia kosteikkokäsittelyllä saadaan aikaan puhdistessa jätevesistä edellä mainittuja lääkeaineita. Lisäksi perehdytään siihen, miten kosteikon erilaiset ominaisuudet vaikuttavat puhdistustehokkuuksiin. Tutkittavia ominaisuuksia ovat kosteikkoon tuleva lääkeaineen pitoisuus, lämpötila, kosteikon tyyppi sekä kosteikkokasvillisuus. Työn pohjana toimivat erilaiset kosteikkotutkimukset, joiden tietojen pohjalta tehdään selvitykset kuvaajia apuna käyttäen. Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena ja kirjallisuudesta kerättyjen tietojen analysointina.

2 KOSTEIKOT

2.1 Kosteikon määritelmä ja kosteikkotyypit

Kosteikko määritellään kosteana alueena, jonka maaperä on kyllästynyt vedellä riittävän pitkän ajanjakson (Kadlec & Wallace 2009). Kosteikon ei tarvitse olla ympärivuotisesti veden peitossa, vaan on tyypillistä, että kosteikko kuivuu sääolosuhteiden muuttuessa (Ympäristöhallinto 2014). Muilta ominaisuuksiltaan erityyppiset kosteikot voivat erota toisistaan suurestikin, minkä vuoksi yhteinen määrittely on usein haastavaa ja määritelmiä on erilaisia (Scholz 2016). Esimerkkeinä kosteikkojen eroavaisuuksista voivat olla niiden maaperän tai kasvillisuuden erot; kosteikon vesi voi olla virtaavaa tai seisovaa, ja vesi voi virrata kosteikossa maan päällä tai maan alla (Tanaka ym. 2011). Tässä työssä kosteikot on luokiteltu yleisesti käytetyllä tavalla virtauksen paikan, maan alla vai päällä, sekä virtauksen suunnan, vaaka- vai pystysuuntaan, perusteella (Kuva 1). Maanpäällisen virtauksen kosteikoissa (SF) on vapaa veden pinta ja ohjeellinen vedensyvyys voi vaihdella; esimerkiksi Tanaka ym. (2011) mukaan vesi virtaa maanpinnan päällä ja matalissa, alle 0,5 metrin syvyyksissä. Maanpäällisen virtauksen kosteikoissa on seisovaa vettä (Scholz 2016). Maanalaisen virtauksen kosteikoissa (SSF) vesi virtaa huokoisen substraatin, kuten soran läpi (Tanaka ym. 2011). Vedenpinta on kosteikon substraatin pinnan alapuolella (Kadlec & Wallace 2009).



Kuva 1. Kosteikkojen luokittelu.

Kosteikoilla on muihin maailman ekosysteemeihin verrattuna useita erityispiirteitä. Runsas vesi mahdollistaa monimuotoisen biologisen toiminnan, minkä seurauksena kosteikot ovatkin biologisesti aktiivisimpia ekosysteemejä maailmassa. (Kadlec & Wallace 2009) Kosteikkokasvillisuus on kehittynyt kostean maaperän vuoksi omanlaisekseen. Hallitsevia kasvilajeja ovat kausittain kasvavat sekä hapettomiin ja kosteisiin olosuhteisiin sopeutuneet lajit. (Tanaka ym. 2011) Kosteikot toimivat elinympäristöinä laajalle eliölajistolle mukaan lukien nisäkkäitä, lintuja, kaloja, matelijoita ja sammakkoeläimiä, joita tavataan harvoin muissa ekosysteemeissä (Kadlec & Wallace 2009). Lisäksi kosteikot toimivat luonnollisena maisemana, tutkimuskohteena ja ihmisten virkistyskäytössä (Scholz 2016).

2.2 Kosteikot jätevesien puhdistuksessa

Kosteikot voivat olla luonnollisesti syntyneitä ja luonnonmukaisia, joihin on mahdollisesti tehty vedenjakamis- ja pengerrakenteita (Kuva 2). Usein kuitenkin jätevesien puhdistuksessa hyödynnetyt kosteikot ovat rakennettuja kosteikkoja. (Kadlec & Wallace 2009) Rakennettu kosteikko on ihmisten rakentama kosteikkosysteemi, joka on suunniteltu mahdollisimman tarkasti luonnonmukaisten kosteikkojen vettä puhdistavia ominaisuuksia mukailevaksi. (Imfeld ym. 2008)



Kuva 2. Rukan jätevedenpuhdistamon jälkeinen kosteikko (kuva: Heini Postila).

Kosteikot parantavat niiden läpi kulkevan veden laatua pidättämällä siitä ravinteita ja kiintoaineita (Ympäristöhallinto 2014). Aineet voivat varastoitua kosteikon eri osiin, kuten maaperään tai kasvillisuuteen (Tanaka ym. 2011). Laajan biologisen aktiivisuutensa vuoksi kosteikot voivat muuntaa useita saasteita, joita jätevesissä esiintyy, harmittomiksi aineiksi tai ravintoaineiksi kosteikon eliöille. (Kadlec & Wallace 2009). Rakennetut kosteikot ovat ikään kuin aurinkovoimalla toimivia jätevesien käsittelylaitoksia, joissa tapahtuvat prosessit vastaavat luonnollisessa kosteikossa tapahtuvia prosesseja (Scholz 2016). Kosteikkokäsittely on yksi edullisimmista jäteveden puhdistusmenetelmistä, sillä esimerkiksi aurinko, maaperä, kasvit ja eläimet, ovat kosteikkojen käyttämiä luonnollisia energian- ja puhdistusprosessien lähteitä. Jätevesien puhdistus kosteikkokäsittelyllä on myös ekologista, sillä se on lähes vapaata fossiilisista polttoaineista ja kemikaaleista. (Kadlec & Wallace 2009)

Erityyppisiä kosteikkoja käytetään eri tarkoituksiin. On tunnettava kosteikon ominaispiirteet ja sen puhdistusprosessit, jotta päästään parhaisiin puhdistustuloksiin. (Imfeld ym. 2008) Esimerkiksi maanalaisen virtauksen kosteikot ovat usein turvallisimpia muulle ympäristölle, koska käsiteltävät ja mahdollisesti haitalliset jätevedet kulkeutuvat kosteikon maanpinnan alapuolella eli vesi ei ole vapaasti esimerkiksi eläinten saatavilla. Niitä voidaan myös hyödyntää kylmemmissä olosuhteissa, kun maanpinnan alla oleva vesi ei jäädy niin nopeasti. Ne ovat kuitenkin kalliimpia rakentaa kuin esimerkiksi lammikot. Maanpäällisen virtauksen kosteikoilla on korkeampi happipitoisuus, mikä on tarpeen joillakin halutuilla prosesseilla. Usein käytetään myös erilaisten kosteikkotyyppien yhdistelmiä. Kosteikkoja voidaan operoida eri menetelmillä, kuten esimerkiksi kosteikkoon tulevan virtauksen säätelyllä. (Kadlec & Wallace 2009)

Jätevesien kosteikkokäsittely on alun perin kehitetty ihmisten asumisesta ja toiminnasta aiheutuvien jätevesien, eli kotitalous- ja yhdyskuntajätevesien käsittelyyn. Kosteikkokäsittelyä on alettu kehittää soveltuvaksi myös esimerkiksi teollisuus-, kaivos- ja hulevesien puhdistukseen. (Kadlec & Wallace 2009) Kosteikkojen optimointi ekologisesti kestävämpään ja tehokkaampaan jätevesien käsittelyyn voi olla kuitenkin ongelmallista (Imfeld ym. 2008). Kosteikkokäsittely on tehokas ja edullinen vaihtoehto perinteisille vedenpuhdistuslaitoksille, mikäli haitta-ainepitoisuudet jätevesissä eivät ole liian suuria. (Kadlec & Wallace 2009)

2.3 Kosteikkojen puhdistustehokkuuteen vaikuttavat tekijät ja prosessit

Jätevesien kosteikkokäsittelyn onnistumiseen ja tehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä on paljon. Oikean veden syvyyden sekä virtauksen luominen ja ylläpitäminen ovat kriittisiä puhdistustehokkuuden kannalta. (Kadlec & Wallace 2009) Liian suuren virtauksen seurauksena vesi kulkee kosteikon läpi nopeasti, jolloin sen viipymäaika jää lyhyeksi. Jäteveden viipymäaika on yksi tärkeimmistä kosteikon puhdistustehokkuuteen vaikuttavista tekijöistä. (Puustinen ym. 2001) Mitä kauemmin vesi pysyy kosteikossa, sitä enemmän aikaa kosteikon prosesseilla on puhdistaa vettä (Kadlec & Wallace 2009). Viipymäaika määrittää sedimentoitumisen eli kiintoaineen laskeutumisen määrän. Kiintoaineeseen on usein sitoutuneena haitta-aineita, joita kosteikkokäsittelyllä pyritään puhdistamaan niiden jäädessä kosteikon maaperään sedimentoitumisen seurauksena. (Puustinen ym. 2001) Myös sorptio eli haitta-aineen kiinnittyminen maaperään sekä haihtuminen ovat kosteikon prosesseja, joissa haitta-aine ei häviä tai muuta muotoaan, vaan siirtyy kosteikon vesifaasista muualle, kuten maaperään tai ilmaan (Imfeld ym. 2008). Kosteikon hydrologiset olosuhteet vaikuttavat kosteikon kasvilajistoon, maaperään, happipitoisuuksiin ja ravinteisiin. Ravinteet ja niiden saatavuus ovat puolestaan merkittävä tekijä kosteikon eliöstön kannalta. (Kadlec & Wallace 2009)

Kosteikkokasvillisuudella on useita merkittäviä vaikutuksia kosteikon puhdistustehokkuuteen (Scholz 2016). Kasvillisuus voi parantaa puhdistustehokkuutta lisäämällä virtausvastusta ja näin ollen veden viipymäaikaa. (Kadlec & Wallace 2009) Kasvillisuus säätelee kosteikon ravinteiden määrää sitomalla ja vapauttamalla niitä kasvukautensa ja elinkaarensa mukaan vedestä. Ravinteiden sidonta on usein tehokasta, sillä kosteikkokasvillisuus tarvitsee paljon ravinteita. Lisäksi kasvillisuus suodattaa kiintoaineita ja niihin sitoutuneita haitta-aineita vedestä. (Puustinen ym. 2001) Kasvit myös siirtävät haitta-aineita jätevedestä ilmakehään transpiraation, eli veden kulkeutumisen kasvin läpi, ja haihduttamisen kautta (Imfeld ym. 2008; Hong ym. 2001). Kasvien varret ja juuret tarjoavat puhdistustehokkuuden kannalta olennaisille mikrobeille kasvu- ja tarttumapintoja, minkä ansiosta niiden kanta kosteikossa kasvaa. Kasvillisuus lisää mikrobien aktiivisuutta myös tuottamalla kosteikkoon happea ja energiaa. (Kadlec & Wallace 2009). Haitta-aineen hajoaminen mikrobitoiminnan seurauksena riippuu aineen fysikaalisista ja kemiallisista ominaisuuksista (Imfeld ym. 2008). Kosteikkokasvillisuuden erityishyöty kylmissä olosuhteissa on sen eristävä vaikutus maaperän jäätymistä vastaan (Puustinen ym. 2001)

Kosteikon lämpötilat riippuvat sen energiavirtauksista. Suurin kosteikkoa lämmittävä tekijä on auringon energia. Energiahäviöt johtuvat suurimmilta osin haihdunnasta. Energiavirtaukset ovat syklisiä ja ne voivat riippua joko vuorokauden- tai vuodenajasta. Kosteikko yrittää tasapainottaa energiavirtaukset siten, että siihen kertyvä ja poistuva energiamäärä olisivat yhtä suuret. Lämpötilalla on suuri vaikutus kosteikon biologisiin ja kemiallisiin prosesseihin, jotka puolestaan vaikuttavat kosteikon puhdistustehokkuuteen. (Kadlec & Wallace 2009) Korkeampi lämpötila edesauttaa kosteikon puhdistustehokkuuden kannalta olennaisten mikrobien aktiivisuutta. (Puustinen ym. 2001)

Kosteikon fyysinen ja kemiallinen ympäristö vaikuttavat sen biologisiin prosesseihin, jotka vaikuttavat puhdistustehokkuuteen. Tärkeimpiä abioottisia tekijöitä ovat veteen liennut happi, redox-potentiaali eli hapetus-pelkistyspotentiaali, pH sekä alkalisuus eli emäksisesti reagoivien aineiden määrä. (Kadlec & Wallace 2009) Muita kosteikon puhdistusprosesseihin vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi veteen liuenneista aineista johtuva sameus (Scholz 2016).

3 LÄÄKEAINEET PUHDISTETTAVISSA JÄTEVESISSÄ

3.1 Jätevesien laatu ja vedenkäsittelyn tavoitteet

Veden laatua on tarkkailtu esimerkiksi sen maun, tuoksun ja ulkonäön, kuten värin ja sameuden perusteella vuosisatojen ajan (Scholz 2016). Vesistöihin laskettavien jätevesien mukana sinne kulkeutuu mm. kiintoaineita, ravinteita, mikrobeja ja muita vesistölle haitallisia aineita. Ne voivat heikentää veden laatua, aiheuttaa rehevöitymistä ja alentaa vesistön hygieniatasoa (Laitinen ym. 2014). Matalat haitta-ainepitoisuudet kuitenkin harvoin aiheuttavat akuutteja haittavaikutuksia, vaan ne ovat havaittavissa vasta pidemmän ajan päästä. Tämän takia haitta-ainepitoisten vesien, etenkin juomavetenä käytettäväksi suunniteltujen vesien, terveysriskien arviointi on välttämätöntä. (Scholz 2016)

Viime vuosikymmeninä on alettu tunnistaa entistä tarkemmin jätevesien erilaisia mikrobiologisia ja kemiallisia komponentteja. Monet niistä ovat luonnollista alkuperää. Ihmistoiminnan seurauksena vesistöihin päätyy kuitenkin haitta-aineita esimerkiksi teollisuudesta, maataloudesta, ihmisten ja eläinten lääkkeistä sekä kotitalouksissa käytettävistä kemikaaleista, esimerkiksi siivous- ja hygieniatuotteista. (Scholz 2016)

Veden ja jäteveden puhdistamista on veloitettu lainsäädännöllä, asetuksilla ja direktiiveillä niin Euroopan unionin kuin Suomenkin tasolla (Laitinen ym. 2014). Vedenkäsittelyllä on kolme päätavoitetta; ihmisravinnoksi turvallisen veden tuotanto, asiakkaalle houkuttelevan veden tuotanto sekä vedenpuhdistamoiden edullinen rakentaminen ja käyttö. Näiden tavoitteiden täyttämiseksi voidaan seurata useita eri laatuparametreja, esimerkiksi aistinvaraisia hajua, makua ja ulkonäköä, fysikaalisia lämpötilaa, pH:ta sekä liuenneiden ja kiintoaineiden pitoisuuksia, mikrobiologisia parametreja sekä haitallisia tai myrkyllisiä aineita. Lisäksi jätevesien käsittely on tärkeää, koska vesivarat ovat rajalliset. (Scholz 2016)

Jäteveden käsittelyprosessi voidaan jakaa käsittelyvaiheiden perusteella esikäsittelyyn, primaarikäsittelyyn, sekundaarikäsittelyyn ja tertiäärikäsittelyyn (Scholz 2016). Jäteveden käsittelyä voidaan jaotella myös eri prosessityyppien mukaan; mekaaniset, kemialliset, biologiset ja mekaanis-biologis-kemialliset prosessit (Laitinen ym. 2014). Usein käsittelemätön jätevesi on vettä, jossa on noin 0,1% kiintoainetta. Primaarikäsittely

on veden puhdistamisen ensimmäinen vaihe, jonka prosesseja ovat esimerkiksi seulonta ja epäorgaanisen kiintoaineen poisto. Primaarikäsittely on mekaanista tai kemiallista (Scholz 2016). Sekundaarisessa käsittelyssä jätevedestä poistetaan vielä kiinteitä aineita ja veteen liuenneita orgaanisia aineita (Kadlec & Wallace 2009). Se on kemiallista tai biologista. Jäteveden kosteikkokäsittely on vähintään sekundaarista käsittelyä. Tertiärikäsittely voi olla mekaanista, kemiallista, biologista tai niiden yhdistelmiä. (Scholz 2016) Tertiärikäsittelyn vaiheita ovat esimerkiksi nitrifikaatio, denitrifikaatio ja fosforin poisto (Kadlec & Wallace 2009).

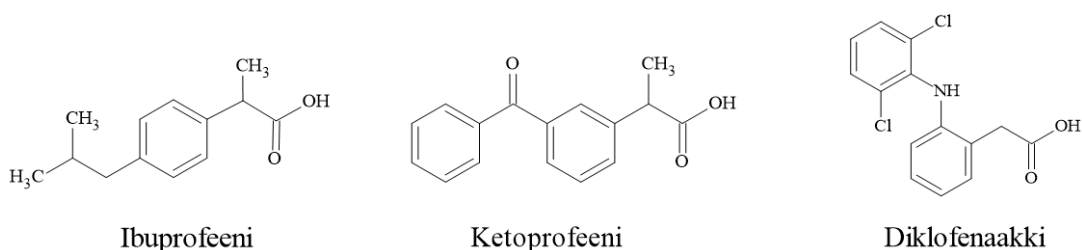
3.2 Lääkeaineet jätevesissä

Perinteisiä jätevedenpuhdistamoita ei ole suunniteltu puhdistamaan lääkeaineita, minkä seurauksena suuri osa jätevesien lääkeaineista päätyy vesistöihin (Ympäristöhallinto 2017). Esimerkiksi Suomen ympäristökeskuksen koordinoimassa EPIC-hankkeessa tarkasteltiin lääkeaineiden esiintymistä ja kuormaa jätevesissä neljällä eri jätevedenpuhdistamolla Suomessa. Lääkeaineiden mediaanipoistumat jätevedenpuhdistamolla vaihtelivat suuresti, esimerkiksi ibuprofeenilla 100% ja diklofenaakilla 17%. (Äystö ym. 2020) Vaikka jäteveden puhdistusta säädellään laissa, se ei sisällä lääkeaineiden poistovaatimuksia (Ympäristöhallinto 2017). Jäämiä lääkeaineista on löydetty ympäristöstä kaikkialla maailmassa vedestä, ilmasta ja maaperästä (Boxall 2004).

Jätevedenpuhdistamoilla lääkeaineet voivat käyttäytyä eri tavoin. Ne voivat muuntaa muotoaan, pidättäytyä puhdistamon jätevesilietteeseen tai päätyä eteenpäin vesistöön. (Äystö ym. 2020) Suurimman lääkeainekuorman aiheuttavat kotitaloudet, hoitolaitokset sekä lääketeollisuus. Niiden jätevesiin lääkeaineet päätyvät tuotannosta, elimistöstä erittyvistä, väärin hävitetyistä ja ulkoisesti käytettävistä lääkkeistä, kuten kipugeeleistä. (Suomen ympäristökeskus 2017 & Boxall 2004) Lääkkeet hävitetään oikeaoppisesti viemällä ne apteekkiin, josta ne toimitetaan eteenpäin ongelmajätteeksi. (Tuderman 2007) Lääkkeitä tuotetaan ja käytetään tuhansia tonneja vuodessa (Boxall 2004). Esimerkiksi diklofenaakkia kertyy Suomessa puhdistettaviin jätevesiin 20-40 kg vuodessa (Ympäristöhallinto 2017). Ibuprofeenin vastaava määrä on 8000 kg, josta vesistöihin päätyy jopa 130 kg (Suomen ympäristökeskus 2017).

Ihmislle ja eläimille suunniteltujen lääkeaineiden mahdollisia haittavaikutuksia ympäristölle on tutkittu vähän (Boxall 2004). Lääkeaineet esiintyvät jätevesissä useiden erilaisten yhdisteiden sekoitelmoina, minkä vuoksi niiden yhteisvaikutukset ovat tuntemattomia (Ympäristöhallinto 2017). Yksittäistenkin lääkeaineiden vaikutuksia on tutkittu vasta vähän, mutta niiden on havaittu aiheuttavan esimerkiksi kaloilla käytöksen ja hormonitoiminnan muutoksia (Suomen ympäristökeskus 2017). Ympäristöön päätyvistä lääkejäämistä osa kulkeutuu myös takaisin ihmiseen esimerkiksi juomaveden välityksellä. Sen puhdistusprosessit eivät ole täysin tehokkaita lääkeaineiden puhdistamisessa, kuten eivät jätevedenpuhdistusprosessitkaan. (Boxall 2004)

Tässä työssä käsiteltävät lääkeaineet ibuprofeeni, ketoprofeeni ja diklofenaakki (Kuva 3) ovat yleisesti käytettyjä tulehduskipulääkkeitä. Tulehduskipulääkkeet lievittävät lihasten, nivelten ja tukielimistön kipua ja turvotusta. Ibuprofeeni on tulehduskipulääke, jota käytetään yleensä tablettimuodossa tilapäisiin kiputiloihin, kuten side- ja tukikudosten särkyyn, vammojen oireisiin ja päänsärkyyn. Ibuprofeeni lievittää myös flunssan oireita ja alentaa kuumetta. Diklofenaakki on usein ulkoisesti käytettävissä lääkevoiteissa vaikuttavana aineena toimiva tulehduskipulääke. Sitä käytetään myös tablettimuotoisissa lääkkeissä esimerkiksi reumatautien, nivelrikkojen ja migreenin hoitoon sekä vammojen jälkihoitoon. Ketoprofeeni sopii myös tilapäisen kivun ja tulehduksellisen kivun hoitoon. Sitä käytetään usein tablettimuotoisena. (Tuderman 2007)



Kuva 3. Ibuprofeenin, ketoprofeenin ja diklofenaakin rakennekaavat.

4 KÄYTETYT MENETELMÄT

4.1 Käytettyjen kosteikkotutkimusten perustiedot

Kosteikkojen puhdistustehokkuuksien tutkimiseen on käytetty kahdeksaa erilaista tutkimusta. Tutkimukset käsittelivät erilaisten lääkeaineiden ja hygieniatuotteiden poistamista jätevesistä. Tutkimusten kosteikot olivat useimmiten rakennettuja. Tässä työssä perehdytään kuitenkin vain ibuprofeenin, ketoprofeenin ja diklofenaakin puhdistusta käsitteleviin tuloksiin. Tutkimusten tuloksia on koottu liitteinä oleviin taulukkoihin (Liitteet 1, 2 ja 3).

Tšekissä tehdyssä tutkimuksessa tarkasteltiin 32:n erilaisen lääkeaineen ja hygieniatuotteen esiintymistä maaseudun jätevesissä sekä niiden puhdistusta kosteikkokäsittelyllä. Tutkimuksen tavoitteena oli arvioida vuodenaikaisvaihtelun vaikutusta lääkeaineiden esiintymiseen ja puhdistamiseen, tutkia aineiden puhdistamisen ja veden laatuparametrien välisiä yhteyksiä sekä ymmärtää lääkeaineiden aiheuttamia ympäristöhaittoja Tšekin vesiympäristöissä. Tutkimuksen kolme kosteikkoa olivat rakennettuja maanalaisen virtauksen kosteikkoja, joissa virtaus oli vaakasuuntaista. Kaksi kosteikoista oli ollut toiminnassa 12-14 vuotta ja yksi 5 vuotta. Kosteikkojen pohjat olivat soraa, jota oli 0,8 metrin kerros. Veden lämpötila vaihteli talvella 5.5-8.3 °C ja kesällä 16.2-18.9 °C välillä. Tutkimus kesti kaksi vuotta. (Chen ym. 2016)

Kaksivuotisen tutkimuksen (Nuel ym. 2018) aikana näytteenotot tehtiin täyden mittakaavan maapäällisen virtauksen kosteikolta, joka sijaitsee alavirtaan pystysuuntaisesta rakennetusta kosteikosta. Näytteet otettiin myös viidestä eri kasvilajista sekä yhdistelmäsedimentistä. Näytteistä tutkittiin kosteikon kykyä puhdistaa yli 50 lääkeainetta ja hygieniatuotetta jätevesistä. Tutkittuun kosteikkoon tulevat jätevedet ovat primaarikäsiteltyjä yhdyskuntajätevesiä. Lisäksi tutkimuksessa huomioitiin vuodenaikaisvaihtelu sekä ikääntyvän kosteikon puhdistustehokkuuden heikkeneminen. Tutkimus suoritettiin Ranskassa.

Hijosa-Valsero ym. (2010) tutkimuksen tavoitteena oli arvioida kolmen erilaisen hybridikosteikon sekä tavanomaisen jätevedenpuhdistamon tehokkuutta poistaa lääkeaineita ja hygieniatuotteita käsiteltävistä jätevesistä. Tutkimuksessa käytetyt jätevedet olivat primaarikäsiteltyjä kaupunkien jätevesiä. Hybridikosteikot olivat

tyypiltään vaihtelevia yhdistelmiä erilaisista lammista sekä rakennetuista kosteikoista (kts. Liitteet 1, 2 ja 3). Lisäksi perehdyttiin tarkemmin ibuprofeenin käyttäytymiseen hybridikosteikkojen eri osissa. Tutkimus kesti neljä viikkoa ja se suoritettiin Espanjassa.

Kokeita suoritettiin erilaisille kosteikoille, jotka olivat yksittäisiä täysikokoisia tai kokeita varten rakennettuja pienoismalleja kosteikoista tai hybridikosteikkoja. Kokeet suoritettiin ulkona sekä kesä- että talviolosuhteissa. Tutkittavat kosteikot erosivat toisistaan erilaisten parametrien välillä, joita olivat esimerkiksi kasvillisuus, virtaustyyppi ja primaarikäsittely. Kokeiden syötteenä toimi espanjalaisen kaupungin jätevesi. (Hijosa-Valsero ym. 2011a)

Rabello ym. (2019) artikkelissa perehdytään erityyppisten kosteikkojen ja leväsäiliöiden kykyyn puhdistaa lääkeaineita ja hygieniatuotteita käsiteltävistä yhdyskuntajätevesistä. Artikkelin lähteinä toimivat useat eri tutkimukset (De Wilt ym. 2016, Hijosa-Valsero ym. 2011b, Llorens ym. 2009, Zhang ym. 2015, Zhu ym. 2014). Kosteikkojen puhdistustehokkuutta arvioitiin tutkimalla esimerkiksi hydraulista veden pidätysaikaa, virtausnopeutta, lämpötilaa sekä aineiden pitoisuutta jätevesissä. Myös kasvillisuuden vaikutus puhdistustehokkuuteen huomioitiin.

Viittä vaakasuuntaisen maanalaisen virtauksen kosteikkoa ja niiden kykyä poistaa lääkeaineita ja hygieniatuotteita käsiteltävistä yhdyskuntajätevesistä tutkittiin Espanjassa kesän ja talven aikana 2008. Tutkimus suoritettiin syöttämällä kosteikkoihin jätevesiä kahdesta erilaisesta primaarikäsittelyjärjestelmästä; sedimentaatioaltaasta sekä hapettomasta ylivirtaus lietereaktorista. Lisäksi tarkkailtiin lämpötilan ja kasvillisuuden vaikutusta puhdistustehokkuuteen. Tutkimus suoritettiin Espanjassa. (Hijosa-Valsero ym. 2011b)

Tšekissä suoritetussa tutkimuksessa (Vymazal ym. 2016) tutkittiin neljää vaakasuuntaisen maanalaisen virtauksen kosteikkoa ja niiden kykyä poistaa 31 erilaista lääkeainetta maaseudun jätevesistä. Kosteikkojen ikä vaihteli 10-22 vuoden välillä. Tutkimus kesti vuoden ja näytteitä otettiin yhteensä seitsemän kertaa.

Ávila ym. (2010) Injektiokoe toteutettiin neljän eri lääkeaineiden ja hygieniatuotteiden käyttäytymisen tutkimiseksi. Kokeessa tarkastellut kosteikot (2 kpl) olivat pienoismalleja vaakasuuntaisen maanalaisen virtauksen kosteikoista, ja niihin johdettiin kaupunkien jätevesiä. Kosteikkoja ennen vedet käsiteltiin hapettomalla lietereaktorilla.

4.2 Tutkimusten analysointiin käytetyt menetelmät

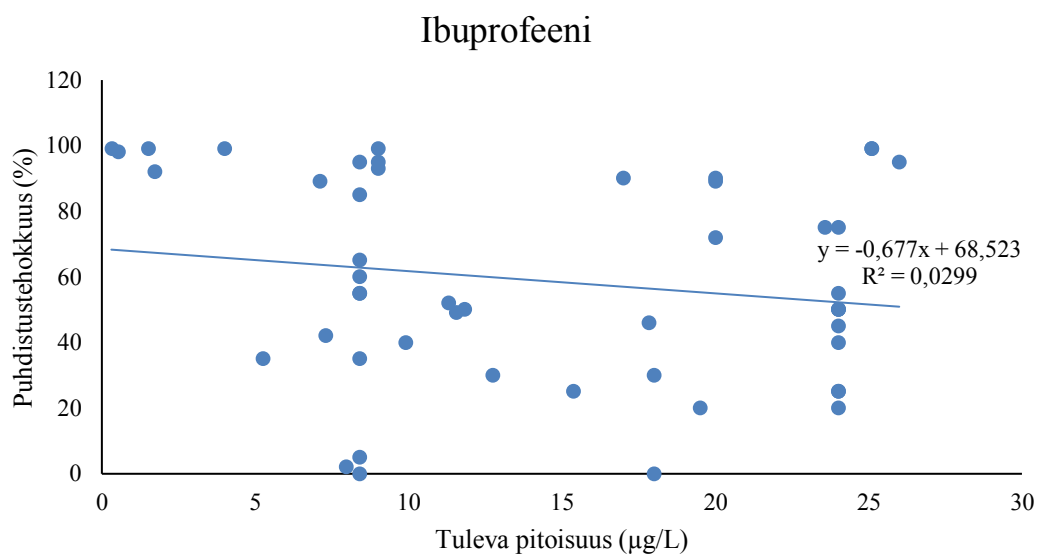
Valituista edellä esitellyistä tutkimuksista taulukoitiin tutkittavia tietoja. Niitä olivat lääkeaineen kosteikkoon tuleva pitoisuus, kosteikon puhdistustehokkuus, lämpötila, kosteikon pinta-ala, kosteikkoon syötetty vesimäärä sekä kosteikon tyyppi, kasvillisuus ja pohjamateriaali. Taulukoinnin pohjana käytettiin Exceliä.

Eri tekijöiden vaikutuksia ja korrelointia puhdistustehokkuuteen tutkittiin vertaamalla puhdistustehokkuutta tiettyyn ominaisuuteen piirtämällä tutkimusten pohjalta saaduista tiedoista kuvaajia ja piirtämällä niihin lineaarisia regressiosuoria. Jos kaikkia ko. vertailuun tarvittavia tietoja ei ole saatavilla, on kyseinen tutkimuskohta jätetty huomiotta. Taulukoiduista tiedoista tarkempaa analyysiä ei tehty kosteikon pohjamateriaalista tai syötetystä vesimäärästä ja pinta-alasta, sillä tietoja niistä oli vähän tai niiden vaihtelevuus ei ollut suurta. Kuvaajien piirto ja tarvittavien lukujen, kuten keskiarvojen, laskeminen tehtiin myös Excelillä. Tarkastelu suoritettiin jokaiselle tutkittavalle lääkeaineelle, eli ibuprofeenille, ketoprofeenille ja diklofenaakille, erikseen.

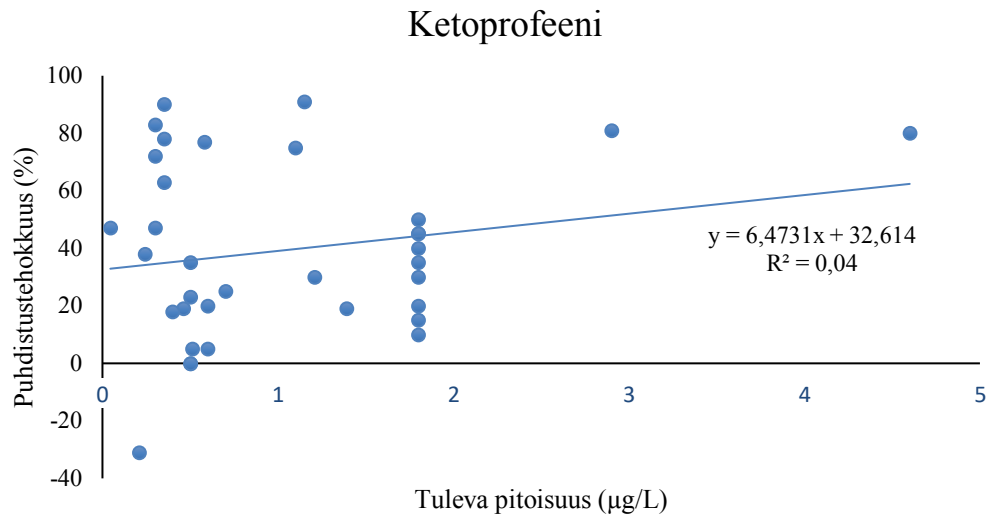
5 KOSTEIKKOJEN PUHDISTUSTEHOKKUUS

5.1 Puhdistustulokset

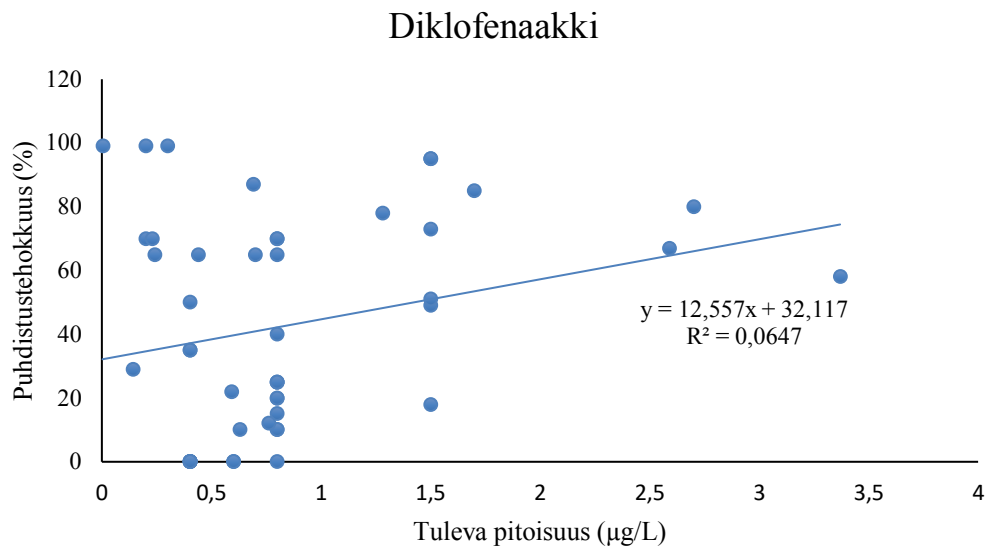
Tarkastellun aineiston perusteella ibuprofeenin puhdistustehokkuus keskimääräisesti heikkenee hieman kosteikkoon tulevan pitoisuuden kasvaessa (Kuva 4). Hajonta on kuitenkin hyvin suurta ja regressiosuoran selitysaste hyvin pieni. Sekä suurilla (26 µg/L) että matalilla (0,31 µg/L) ibuprofeenin pitoisuuksilla on saatu yli 90% puhdistustehokkuuksia. Ketoprofeenin (Kuva 5) ja diklofenaakin (Kuva 6) kohdalla puhdistustehokkuus paranee hieman tulevan pitoisuuden kasvaessa, mutta myös niissä hajonta hyvin suurta. Lisäksi pienemmillä lääkeaineen pitoisuuksilla on saatu hyviä, tarkastelluista tutkimuksista jopa parhaita, puhdistustuloksia. Esimerkiksi vain 0,003 µg/L diklofenaakkipitoisuus jätevedessä on saatu puhdistettua 99%:sti. Ketoprofeenin ja diklofenaakin kohdalla huonoimmat puhdistustulokset ilmenevät alhaisilla lääkeaineen pitoisuuksilla



Kuva 4. Ibuprofeenin puhdistustehokkuus tulevan pitoisuuden funktiona.



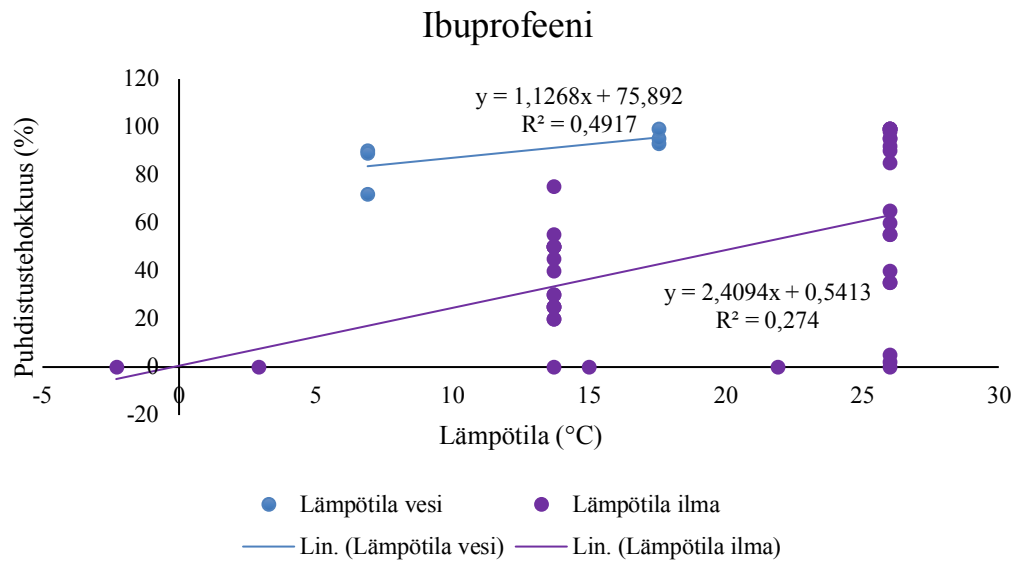
Kuva 5. Ketoprofeenin puhdistustehokkuus tulevan pitoisuuden funktiona.



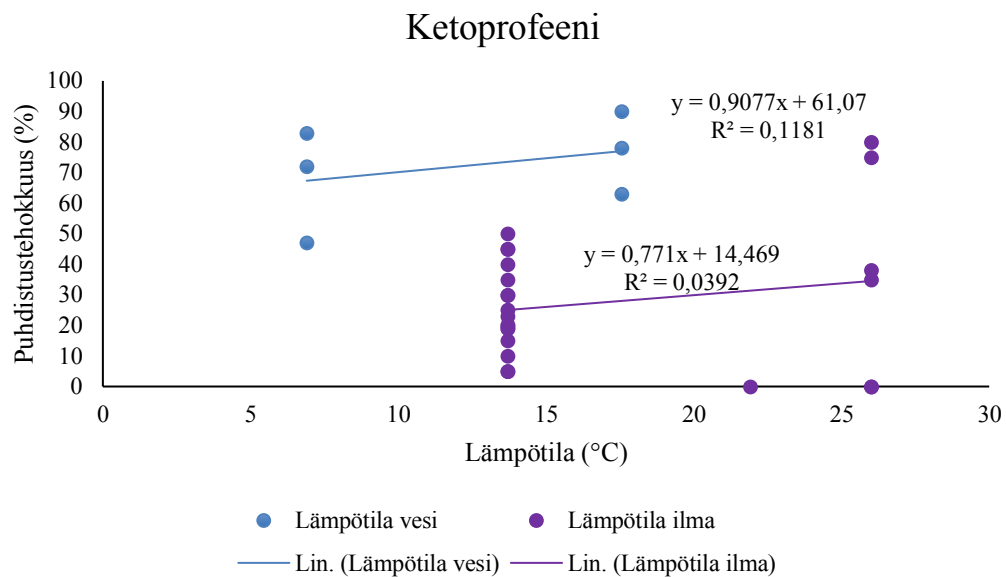
Kuva 6. Diklofenaakin puhdistustehokkuus tulevan pitoisuuden funktiona.

Lämpötilan kasvaminen näyttää parantavan keskimäärin hieman kaikkien tutkittavien lääkeaineiden puhdistustehokkuutta (Kuvat 7, 8 ja 9), mutta niissäkin hajonta on suurta. Tämä pätee sekä ilman että veden lämpötilaan. Ibuprofeenilla matalin puhdistustehokkuus on saatu matalimmalla tutkitulla lämpötilalla. Kuitenkin myös suuremmilla lämpötiloilla on saatu heikkoja, jopa 0% puhdistustehokkuuksia. Paras puhdistustehokkuus on saavutettu tutkittavimmista lämpötiloista korkeimmalla. Ketoprofeenilla alhaisimmat puhdistustehokkuudet on saatu korkeammilla lämpötiloilla, vaikka muutoin sen puhdistustehokkuus on parantunut lämpötilan kasvaessa, ja korkeammilla lämpötiloilla on saatu hyviä tuloksia. Diklofenaakin puhdistuksessa on

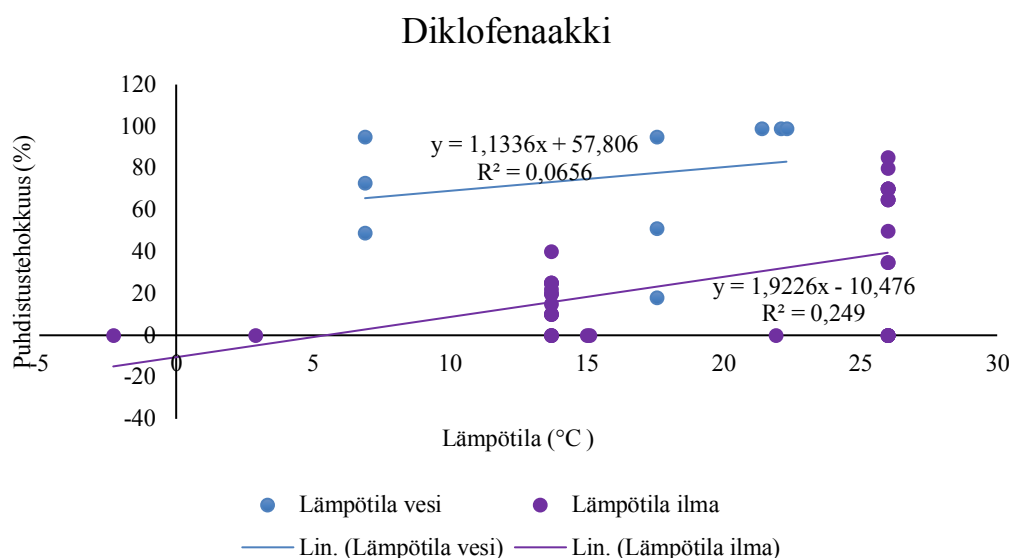
saatu huonoimpia 0% puhdistustehokkuuksia vaihtelevilla lämpötilan arvoilla. Myös parhaimmat puhdistustehokkuudet on saatu vaihtelevilla lämpötiloilla.



Kuva 7. Ibuprofeenin puhdistustehokkuus lämpötilan funktiona. Veden lämpötilan arvot ovat keskiarvot mittausarvojen vaihteluväliltä.

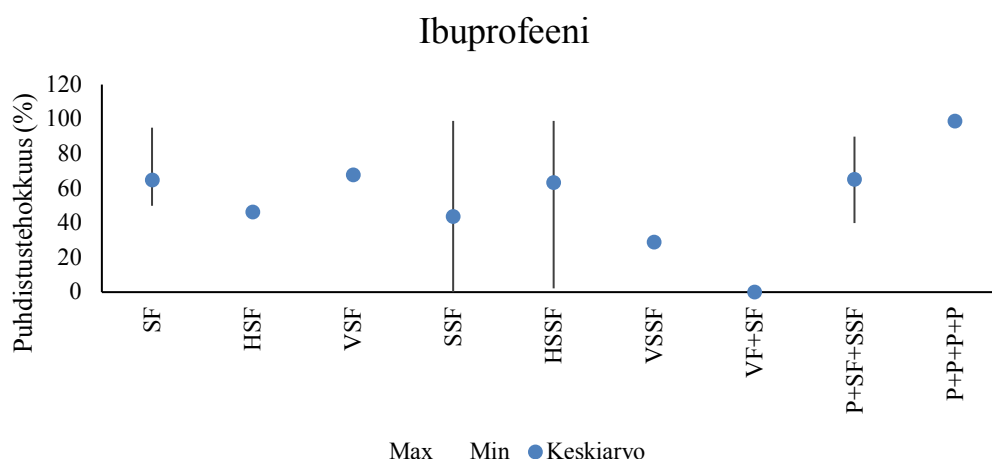


Kuva 8. Ketoprofeenin puhdistustehokkuus lämpötilan funktiona. Veden lämpötilan arvot ovat keskiarvot mittausarvojen vaihteluväliltä.

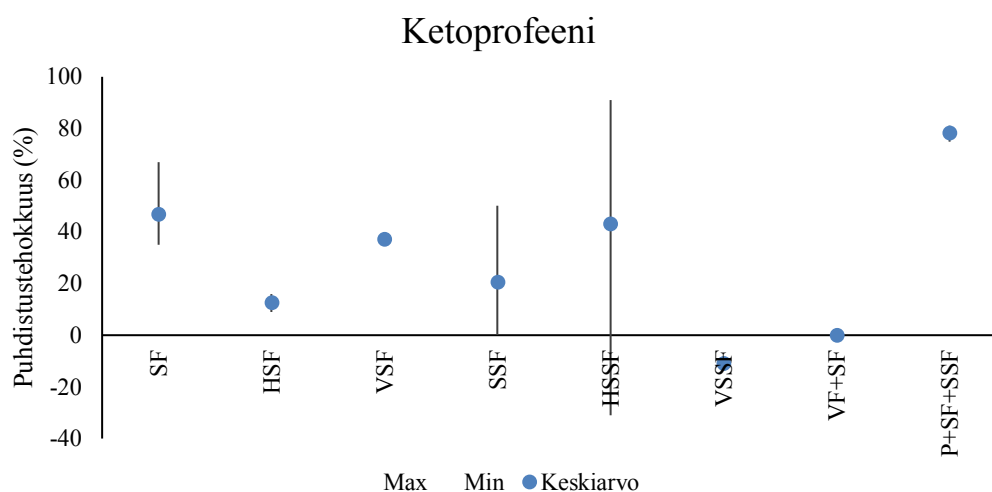


Kuva 9. Diklofenaakin puhdistustehokkuus lämpötilan funktiona. Veden lämpötilan arvot ovat keskiarvot mittausarvojen vaihteluväliltä.

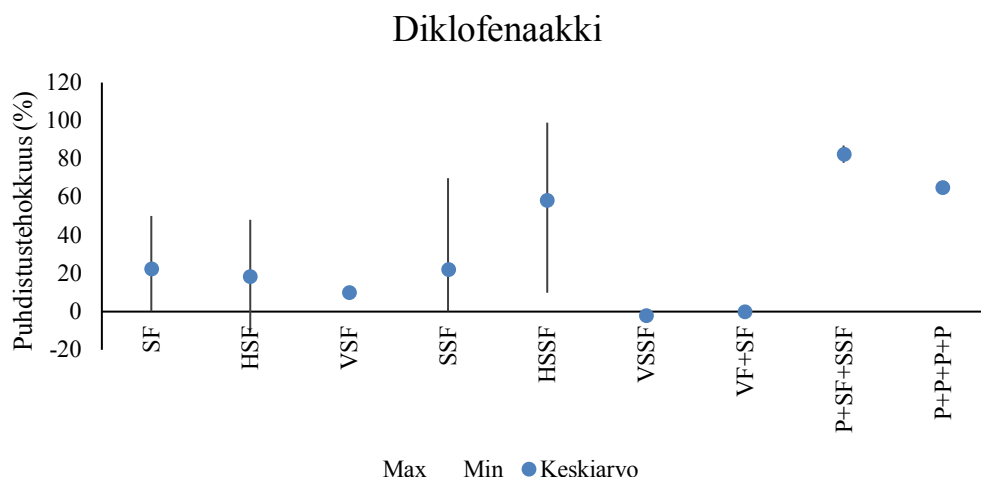
Tutkittaessa kosteikkotyypin vaikutusta puhdistustehokkuuteen huomataan, että tarkastelluissa tutkimuksissa jokaisella lääkeaineella huonoimmat puhdistustulokset on saatu pystysuuntaisen maanalaisen virtauksen kosteikoilla (VSSF) sekä pystysuuntaisen ja maanpäällisen virtauksen kosteikkojen yhdistelmällä (VF+SF) (Kuvat 10, 11 ja 12). Parhaimpia puhdistustuloksia on saatu yleensä eri kosteikkojen yhdistelmillä. Suurin vaihteluväli puhdistustehokkuuksissa kaikilla lääkeaineilla oli maanalaisen virtauksen (SSF) kosteikoilla sekä tarkennetulla määritelmällä olevien vaakasuuntaisen maanalaisen virtauksen kosteikoilla (HSSF). Eri kosteikkotyypeillä saadut puhdistustehokkuudet vaihtelevat eri lääkeaineilla.



Kuva 10. Ibuprofeenin puhdistustehokkuus eri kosteikkotyypeittäin. HSF=vaakasuuntainen maanpäällinen virtaus, HSSF=vaakasuuntainen maanalainen virtaus, P=lammikko, SF=maanpäällinen virtaus, SSF=maanalainen virtaus, VSF=pystysuuntainen maanpäällinen virtaus, VSSF=pystysuuntainen maanalainen virtaus.

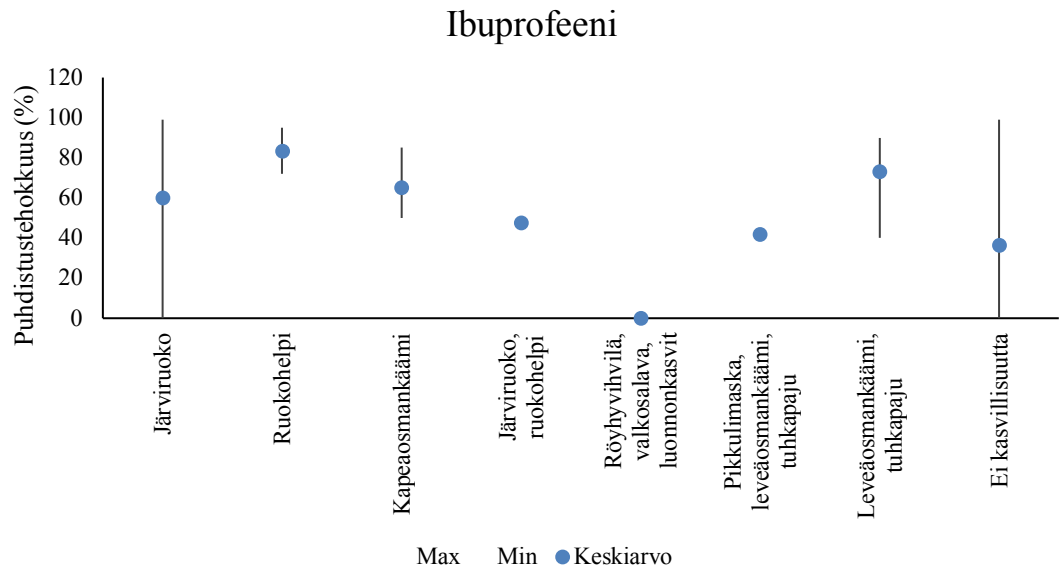


Kuva 11. Ketoprofeenin puhdistustehokkuus eri kosteikkotyypeittäin. HSF=vaakasuuntainen maanpäällinen virtaus, HSSF=vaakasuuntainen maanalainen virtaus, P=lammikko, SF=maanpäällinen virtaus, SSF=maanalainen virtaus, VSF=pystysuuntainen maanpäällinen virtaus, VSSF=pystysuuntainen maanalainen virtaus.

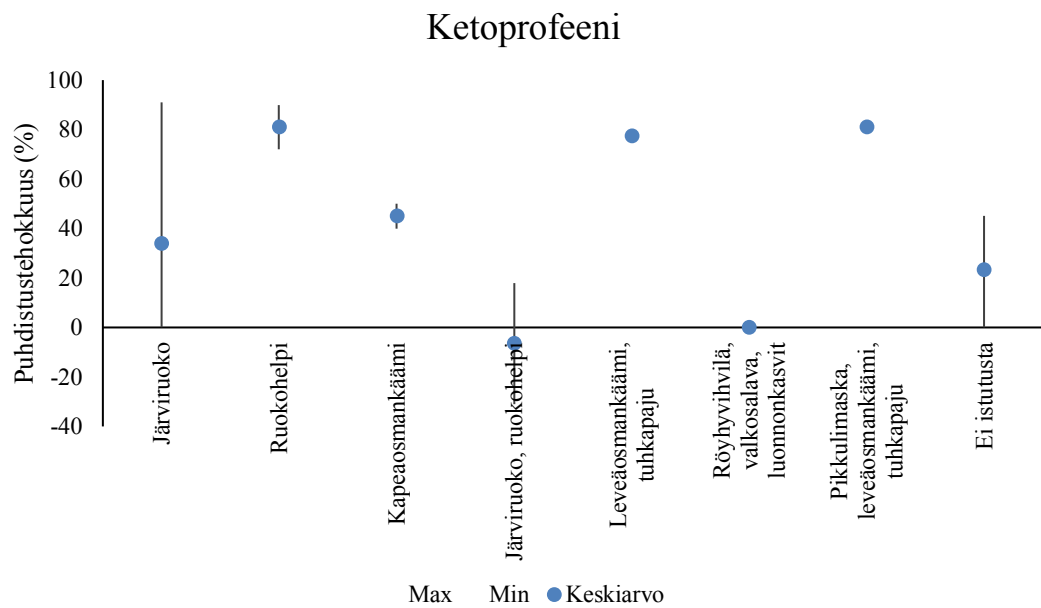


Kuva 12. Diklofenaakin puhdistustehokkuus eri kosteikkotyypeittäin. HSF=vaakasuuntainen maanpäällinen virtaus, HSSF=vaakasuuntainen maanalainen virtaus, P=lammi, SF=maapäällinen virtaus, SSF=maanalainen virtaus, VSF=pystysuuntainen maanpäällinen virtaus, VSSF=pystysuuntainen maanalainen virtaus.

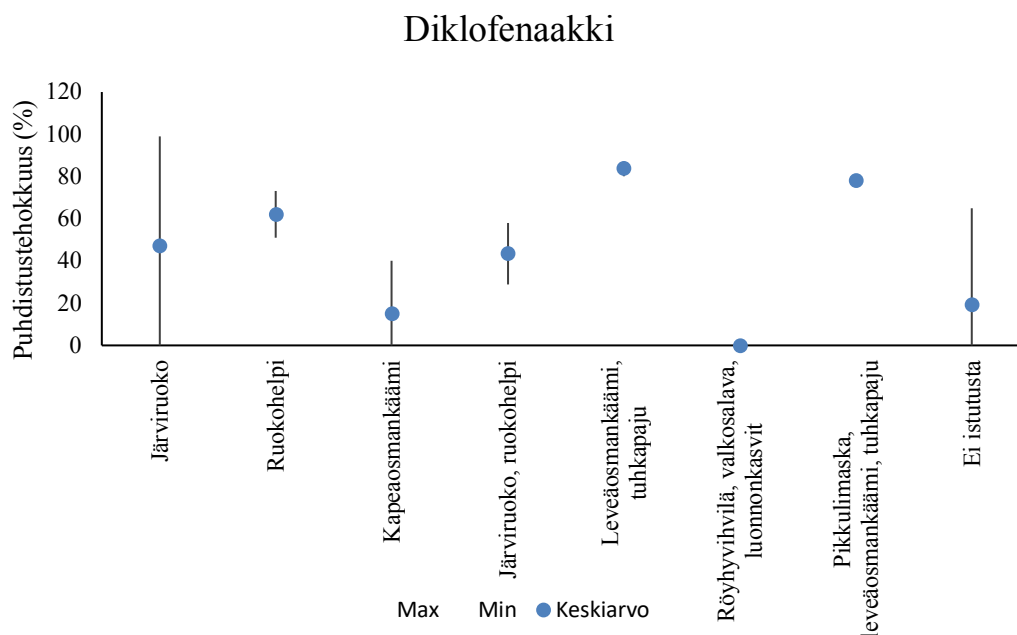
Kosteikkojen kasvillisuuden ja puhdistustehokkuuden välinen suhde vaihtelee lääkeaineittain. Ibuprofeenilla (Kuva 13) parhaita puhdistustuloksia on saavutettu kosteikolla, jossa on ruokohelpiä tai leveäsmankäämiä ja tuhkapajua. Yleensä kosteikolla, jossa on kasveja, puhdistustehokkuuden keskiarvo on ollut yli 40%, paitsi kosteikolla, jossa on ollut röyhyvihvilän, valkosalavan, luonnonkasvien yhdistelmä. Siellä se on ollut 0%. Kosteikolla, jossa ei ole ollut kasvillisuutta ibuprofeenin puhdistustehokkuus on noin 36%. Ketoprofeenin (Kuva 14) poistamisessa jätevedestä parhaita tuloksia on saatu kosteikolla, jossa kasvaa ruokohelpiä, leveäsmankäämiä ja tuhkapajua, sekä kosteikolla, jossa kasvaa pikkulimaskaa, leveäsmankäämiä ja tuhkapajua. Ilman kasvillisuutta puhdistustehokkuus on noin 23%. Röyhyvihvilän, valkosalavan, luonnonkasvien yhdistelmällä se on 0%. Diklofenaakille (Kuva 15) parhaat puhdistustehokkuudet on saatu leveäsmankäämin ja pikkulimaskan, leveäsmankäämin ja tuhkapajun yhdistelmillä. Muilla kasvilajeilla ja niiden yhdistelmillä on saatu vaihtelevia tuloksia. Myös diklofenaakilla röyhyvihvilän, valkosalavan, luonnonkasvien yhdistelmällä puhdistustehokkuus on 0%. Ilman istutusta diklofenaakin puhdistustehokkuus jää alle 20%.



Kuva 13. Ibuprofeenin puhdistustehokkuus eri kasvilajeittain



Kuva 14. Ketoprofeenin puhdistustehokkuus eri kasvilajeittain.



Kuva 15. Diklofenaakin puhdistustehokkuus eri kasvilajeittain

5.2 Puhdistustulosten tarkastelu

Tutkimustuloksista voidaan päätellä, että korkeampi lääkeaineen pitoisuus puhdistettavassa jätevedessä voi edesauttaa ketoprofeenin ja diklofenaakin puhdistustehokkuutta. Tätä tukee esimerkiksi Zhang ym. (2012) tekemä tutkimus (Chen ym. 2016), jonka mukaan diklofenaakin korkeampi pitoisuus jätevedessä saa aikaan myös korkeamman puhdistustehokkuuden. Ibuprofeenin puhdistustehokkuus ei kuitenkaan kasvanut tässä tutkimuksessa kosteikkoon tulevan lääkeaineen pitoisuuden kasvaessa. Useissa tutkimuksissa ibuprofeenille on saatu hyviä puhdistustuloksia ja Vymazal ym. (2016) mukaan ibuprofeenin pitoisuudet jätevesissä ovat usein korkeimmat, minkä vuoksi sen puhdistustehokkuuskin olisi hyvä.

Lämpötilan nousu kasvattaa puhdistustehokkuutta kaikilla tutkittavilla lääkeaineilla. Lämpötilan lisäksi myös vuodenaikaisvaihtelulla on tarkasteltujen tutkimusten perusteella positiivinen vaikutus puhdistustehokkuuteen, koska kesällä tutkimuskohteissa on lämpimämpää ja aurinkoisempaa sekä kasvien toiminta on aktiivisempaa. (Hijosa-Valsero ym. 2011a & Nuel ym. 2016 & Vymazal ym. 2016) Myös esimerkiksi Zhang ym. (2016) (Chen ym. 2016) väittää, että lämpötila on yksi ketoprofeenin puhdistustehokkuuteen eniten vaikuttava tekijä. Talvisin eli tutkimuskohteissa kylmemmän ajanjakson aikana lääkeaineiden pitoisuudet jätevedessä ovat suurempia kuin kesäisin (Nuel ym. 2016). Tämä on kuitenkin ristiriidassa ajatuksen kanssa siitä, että

sekä korkeampi lääkeaineen pitoisuus jätevedessä että korkeampi lämpötila parantaisivat puhdistustehokkuutta.

Kosteikkotyypin vaikutus puhdistustehokkuuteen vaihtelee eri lääkeaineilla. Suurin hajonta kaikilla lääkeaineilla oli SSF ja HSSF tyypin kosteikoilla, mikä todennäköisesti selittyy sillä, että niistä oli eniten tutkimustuloksia. Huonoimpia puhdistustehokkuuksia on saatu VSSF ja VF+SF kosteikoilla. Vymazal ym. (2016) mukaan ibuprofeenin puhdistustehokkuus olisi parasta kosteikoilla, joilla vesi virtaa maanpinnan päällä, riippuen sen aerobisesta hajoamisesta ja fotolyysistä eli yhdisteen hajoamisesta valon vaikutuksesta. Tutkimuksen kosteikkotyypeistä parhaita tuloksia onkin saatu kaikille lääkeaineille eri kosteikkojen yhdistelmillä, joissa molemmissa on ollut myös lammikko (P+SF+SSF ja P+P+P+P), mikä tukee Vymazal ym. (2016) väitettä.

Kasvillisuuden läsnäolo näyttää parantavan kosteikon puhdistustehokkuutta, sillä ilman kasvillisuutta olevat kosteikot tuottavat jokaisella tutkittavalla lääkeaineella heikoimpia puhdistustuloksia. Myös Hijosa-Valsero ym. (2010) ja Hijosa-Valsero ym. (2011a) ovat havainneet kasveilla läsnäolon parantavan lääkeaineiden puhdistustehokkuutta. Tietyllä kasvillisuusyhdistelmällä on saatu vain 0% puhdistustehokkuuksia, mutta muiden hyvien tulosten varjolla voisi olettaa, ettei tämä huono tulos ole kasvillisuudesta kiinni. Esimerkiksi Nuel ym. (2016) tutkimuksessa ibuprofeeni on imeytynyt kaikkiin mukana olleisiin kasvilajeihin. Tutkimuksessa tuhkapaju imee enemmän lääkkeitä kuin röyhyvihvilä, mikä ilmenee myös tämän työn tuloksista. Parhaita puhdistustuloksia eri lääkeaineilla on saatu kosteikoilla, joissa on ruokohelpiä, leveäosmankäämiä, tuhkapajua sekä pikkulimaskaa.

Puhdistustehokkuuteen ja sen tutkimiseen voivat vaikuttaa myös satunnaiset tekijät ja eri lääkeaineiden välillä on myös eroja. Esimerkiksi Nuel ym. (2018) mukaan lääkeaineen ominaisuudet vaikuttavat niiden käyttöön kosteikossa. Lisäksi Avila ym. (2010) kertoo, että puhdistustehokkuus riippuu aineesta ja etenkin sen sorptiosta ja biohajoamisesta. Ibuprofeenin puhdistustulokset ovat usein olleet parhaita verrattuna muihin lääkeaineisiin (Hijosa-Valsero ym. 2011a).

6 YHTEENVETO

Kosteikot ovat monipuolisia biologisesti aktiivisia ekosysteemejä, jotka tarjoavat ympäri maailman elinympäristöjä eläimille ja kasveille, virkistysmahdollisuuksia ihmisille sekä useita muita käyttömahdollisuuksia. Kosteikkojen kykyä toimia osana jätevedenpuhdistusta on hyödynnetty pitkään esimerkiksi typen ja fosforin poistamisessa, mutta mielenkiinto on herännyt myös kosteikkojen kykyyn poistaa lääkeaineita käsiteltävistä jätevesistä. Jätevesissä on suuria määriä lääkeaineita, jotka ovat peräisin esimerkiksi ihmisestä erittymisestä lääkeaineen käytön jälkeen ja lääketeollisuudesta. Huomattava osa jätevesien lääkeainejäämistä päätyy ympäristöön tai jopa takaisin ihmiseen juomaveden välityksellä. Lääkeaineiden haittavaikutukset ympäristössä ovat vielä suurelta osin tuntemattomia.

Ibuprofeenin, ketoprofeenin ja diklofenaakin puhdistusta jätevesistä kosteikkokäsittelyllä tutkittiin keräämällä tietoja kahdeksasta eri kosteikkotutkimuksesta. Tutkimusten tietoja taulukoitiin ja taulukoitujen tietojen pohjalta piirrettiin kuvaajia ja niihin lineaarisia regressiosuoria tulosten tutkimiseksi. Tutkittavia tekijöitä olivat kosteikkoon tuleva lääkeaineen pitoisuus, lämpötila, kosteikkotyypin ja kosteikkokasvillisuus.

Kosteikkokäsittely poistaa yleisesti ibuprofeenia, ketoprofeenia ja diklofenaakkia käsiteltävistä jätevesistä. Korkeampi lääkeaineen pitoisuus kosteikkoon syötettävässä jätevedessä parantaa ketoprofeenin ja diklofenaakin puhdistustehokkuutta. Korkeampi lämpötila edesauttaa kaikkien tutkittujen lääkeaineiden puhdistusta. Lisäksi voidaan todeta, että vuodenaikana kesä tutkimuksia suorittaneissa maissa lämpimänä ja aurinkoisena vuodenaikana vaikuttaa positiivisesti puhdistustehokkuuteen. Kosteikkotyypin vaikutukset eri lääkeaineiden puhdistukseen vaihtelevat, eikä tämän tutkimuksen mukaan voida yleistää tehokkainta kosteikkotyyppiä puhdistamaan lääkeaineita jätevedestä. Parhaita puhdistustuloksia on kuitenkin saatu eri kosteikkojen yhdistelmillä. Kosteikkokasvillisuuden yleisesti voidaan todeta parantavan kosteikon puhdistustehokkuutta. Parhaita puhdistustuloksia tutkittaville lääkeaineille on saatu kosteikoilla, joissa on ruokohelpiä, leveäosmankäämiä, pikkulimaskaa ja tuhkapajua.

Kosteikkokäsittely voi tuoda hyviä puhdistustuloksia käsiteltäessä lääkeainepitoista jätevettä. Useilla eri tekijöillä ja prosesseilla voidaan havaita olevan vaikutusta puhdistustehokkuuteen. Niitä ovat tutkimuksen perusteella ainakin lämpötila sekä

kosteikkokasvillisuus. Lisäksi eri lääkeaineiden puhdistamiseen vaikuttavilla tekijöillä on eroja. Kuitenkin jatkotutkimukset etenkin eri kosteikkotyyprien ja kasvilajien vaikutuksesta ovat tarpeellisia.

LÄHDELUETTELO

Aurinkomatkat, 2020. Espanja, Espanja – sää ja lämpötilat [verkkodokumentti]. Aurinkomatkat, saatavissa: <https://www.aurinkomatkat.fi/espanja/saa> [viitattu 21.1.2020]

Ávila C., Oedescoll A., Matamoros V., Bayona J.M., García J., 2010. Capacity of a horizontal subsurface flow constructed wetland system for the removal of emerging pollutants: An injection experiment. *Chemosphere*, 81 s. 1137-1142 DOI: 10.1016/j.chemosphere.2010.08.006

Boxall A. B. A., 2004. The environmental side effects of medication. EMBO Press, 1110-1116 s. DOI: 10.1038/sj.embor.7400307

Chen Y., Vymazal J., Březinová T., Koželuh M., Kule L., Huang J., Chen Z., 2016. Occurrence, removal and environmental risk assessment of pharmaceuticals and personal care products in rural wastewater treatments wetlands. *Science of The Total Environment*, 566-567 s.1660-1669 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.06.069

De Wilt A., Butkovskyi A., Tuantet K., Leal L. H., Fernandes T. V., Langenhoff A., Zeeman G. 2016. Micropollutant removal in an algal treatment system fed with source separated wastewater streams. *Journal of Hazardous Materials*, 304 s. 84–92 DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.10.033

Hijosa-Valsero M., Matamoros V., Martín-Villacorta J., Bécares E., Bayona J., 2010. Assessment of full-scale natural systems for the removal of PPCPs from wastewater in small communities. *Water Research*, 44 s.1429-1439 DOI: 10.1016/j.watres.2009.10.032

Hijosa-Valsero M., Matamoros V., Sidrach-Cardona R., Pedescoll A., Martín-Villavorta J., García J., Bayona H. M., Bécares E., 2011a. Influence of design, physico-chemical and environmental parameters on pharmaceuticals and fragrances removal by constructed wetlands. *Water Science & Technology*, 63 s. 2527-2534 DOI: 10.2166/wst.2011.500

Hijosa-Valsero M., Matamoros V., Pedescoll A., 2011b. Evaluation of primary treatment and loading regimes in the removal of pharmaceuticals and personal care products from urban wastewaters by subsurface-flow constructed wetlands. *International Journal of*

Environmental Analytical Chemistry, 91 s. 632-653 DOI: 10.1080/03067319.2010.526208

Hong, M. S., Farmayan, W. F., Dortch, I. J., Chiang, C. Y., 2001. Phytoremediation of MTBE from a groundwater plume. *Environmental Science & Technology* 35, 1231–1239 s. DOI: 10.1021/es001911b

Imfeld G., Braeckeevelt M., Kusch P., Richnow H. H., 2008 Monitoring and assessing processes of organic chemicals removal in constructed wetlands. *Chemosphere*, 74 s. 349-362 DOI: 10.1016/j.chemosphere.2008.09.062

Kadlec R.H., Wallace S.D., 2009. *Treatment wetlands*, 2nd ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1001 s. ISBN: 978-1-56670-526-4

Laitinen J., Nieminen J., Saarinen R., Toivikko S., 2014. Paras käyttökelpoinen taktiikka (BAT) – Yhdyskuntien jätevedenpuhdistamot. Ympäristöministeriö: Suomen ympäristö 3/14 ISBN: 978-952-11-4286-4

Llorens E., Matamoros V., Domingo V., Bayona J. M., García J. 2009. Water quality improvement in a full-scale tertiary constructed wetland: effects on conventional and specific organic contaminants. *Science of the Total Environment*, 407(8) s. 2517–2524 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2008.12.042

Nuel M., Laurent J., Bois P., Heintz D., Wanko A., 2018. Seasonal and ageing effect on the behavior of 86 drugs in a full-scale surface treatment wetland: Removal efficiencies and distribution in plants and sediments. *Science of The Total Environment*, 615 1099-1109 s. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.061

Puustinen M., Koskiahio J., Gran V., Jormoja J., Majjala T., Mikkola-Roos M., Puumala M., Riihimäki J., Rätty M., Sammalkorpi I., 2001. Maatalouden vesiensuomelukosteikot, VESIKOT-projektin loppuraportti. Helsinki: Suomen ympäristökeskus, Suomen ympäristö 499, 61 s. ISBN 952-11-0932-7

Rabello V.M., Teixeira L.C.R.S., Goncalves A.P.V., de Sà Salomão A., 2019. The efficiency of constructed wetland and algae tanks for the removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs): a systematic review. *Water, Air & Soil Pollution*, 230 s. 236 DOI: 10.1007/s11270-019-4304-9

Suomen ympäristökeskus 2017. Tuleeko lääkejäämien poistaminen jätevesistä pakolliseksi? [verkkodokumentti]. Helsinki: Suomen ympäristökeskus, saatavissa: [https://www.syke.fi/fi-](https://www.syke.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Uutiskirjeet/Vesikirje/Tuleeko_laakejaamien_poistaminen_jateves(42678))

FI/Ajankohtaista/Uutiskirjeet/Vesikirje/Tuleeko_laakejaamien_poistaminen_jateves(42678) [viitattu 8.3.2020]

Scholz M., 2016. Wetlands for water pollution control. Salford: The university of Salford, 556 s. ISBN 978-0-444-63607-2

Tanaka N., NG W.J., Jinadasa K.B.S.N, 2011. Wetlands for tropical applications: Wastewater treatment by constructed wetlands. Lontoo: Imperial College Press, 150 s. ISBN-13 978-1-84816-297-6

Tuderman P., 2007. Lääkeopas 2008-2009. Helsinki: Otava. 784 s. ISBN: 978-951-1-22187-6

Vymazal J., Dvornáková Brezinová T., Kozeluh M., Kule L., 2016. Occurrence and removal of pharmaceuticals in four full-scale constructed wetlands in the Czech Republic – the first year of monitoring. Ecological Engineering, 98 s. 354-364 DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.08.010

Ympäristöhallinto, 2017. Lääkejäämät talteen jo päästölähteillä [verkkodokumentti]. Helsinki: Suomen ympäristökeskus, saatavissa: https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi/Laakejaamat_talteen_jo_paastolahteilla [viitattu 8.3.2020]

Ympäristöhallinto, 2014. Vesi, Monivaikutteiset kosteikot [verkkodokumentti]. Helsinki: Suomen ympäristökeskus, saatavissa: https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi/Vesien_kaytto/Maankuivatus_ja_ojitus/Luonnonmukainen_peruskuivatus/Monivaikutteiset_kosteikot [viitattu 28.1.2010]

Zhang D., Ni W., Gersberg R. M., Ng W. J., Tan S. K. 2015. Performance characterization of pharmaceutical removal by horizontal subsurface flow constructed wetlands using multivariate analysis. CLEAN – Soil, Air, Water, 43(8) s. 1181–1189 DOI: 10.1002/clen.201400294

Zhu S., Chen H., 2014. The fate and risk of selected pharmaceutical and personal care products in wastewater treatment plants and a pilot-scale multistage constructed wetland

system. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(2) s. 1466–1479 DOI: 10.1007/s11356-013-2025-y

Äystö L., Vieno N., Fjäder P., Mehtonen J., Nystén T., 2020. Lääkeaineiden kuorma jätevedenpuhdistamoille ja niiden primääripäästölähteet. *Vesitalous*, 1/20 5-8 s.

Taulukko 1. Ibuprofeenin puhdistustehokkuuteen liittyvät tiedot tarkastelluista kosteikkotutkimuksista.

Tuleva pitoisuus ka (min-max) (µg/L)	Puhdistustehokkuus ka (min-max) (%) ^a	Lämpötila (°C) ^b	Kosteikon pinta-ala (m ²)	Syötetty vesimäärä (l/d)	Kosteikon tyyppi ^{c,d}	Kosteikon kasvillisuus	Kosteikon pohjamateriaali	Lähde
20 (6-65)	90 (74-99)	5,5-8,3 (V)	504	n.a.	HSSF	järviruoko	sora	(Chen ym. 2016)
9 (2-19)	93 (74-99)	16,2-18,9 (V)	504	n.a.	HSSF	järviruoko	sora	
20 (6-65)	72 (74-99)	5,5-8,3 (V)	2 645	n.a.	HSSF	ruokohelpi	sora	
9 (2-19)	95 (74-99)	16,2-18,9 (V)	2 645	n.a.	HSSF	ruokohelpi	sora	
20 (6-65)	89 (74-99)	5,5-8,3 (V)	983	n.a.	HSSF	järviruoko	sora	
9 (2-19)	99 (74-99)	16,2-18,9 (V)	983	n.a.	HSSF	järviruoko	sora	
n.a. (n.a.-n.a.)	0 (n.a.-n.a.)	21,9 (I)	750	n.a.	VF+SF	röyhyvihvilä, valkosalava, luonnonkasvit	muta	(Nuel ym. 2018)
n.a. (n.a.-n.a.)	0 (n.a.-n.a.)	15,0 (I)	750	n.a.	VF+SF	röyhyvihvilä, valkosalava, luonnonkasvit	muta	
n.a. (n.a.-n.a.)	0 (n.a.-n.a.)	-2,3 (I)	750	n.a.	VF+SF	röyhyvihvilä, valkosalava, luonnonkasvit	muta	
n.a. (n.a.-n.a.)	0 (n.a.-n.a.)	2,9 (I)	750	n.a.	VF+SF	röyhyvihvilä, valkosalava, luonnonkasvit	muta	
n.a. (n.a.-n.a.)	n.a. (30-70)	15,1 (I)	750	n.a.	VF+SF	röyhyvihvilä, valkosalava, luonnonkasvit	muta	
1,5 (1,14-2,15) ^f	99 (42-99)	n.a.	12 320	3200	P+P+P+P	n.a.	n.a.	(Hijosa-Valsero ym. 2010)
7,3 (3,56-15,6) ^f	42 (42-99)	n.a.	1 702	20	P+SF+SSF	pikkulimaska, leveäosmankäämi, tuhkapaju	sora	
7,1 (3,69-12,79) ^f	89 (42-99)	n.a.	803	56	P+SF+SSF	leveäosmankäämi, tuhkapaju	n.a.	
24 (n.a.-n.a.)	55 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1	n.a.	SF	kapeaosmankäämi	n.a.	(Hijosa-Valsero ym. 2011a)
8,4 (n.a.-n.a.)	85 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	1	n.a.	SF	kapeaosmankäämi	n.a.	
24 (n.a.-n.a.)	50 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1	n.a.	SF	kapeaosmankäämi	n.a.	

8,4 (n.a.-n.a.)	65 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	1	n.a.	SF	kapeaosmankäämi	n.a.	
24 (n.a.-n.a.)	75 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1	n.a.	SSF	kapeaosmankäämi	n.a.	
8,4 (n.a.-n.a.)	60 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	1	n.a.	SSF	kapeaosmankäämi	n.a.	
24 (n.a.-n.a.)	45 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1	n.a.	SSF	ei istutusta	n.a.	
8,4 (n.a.-n.a.)	55 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	1	n.a.	SSF	ei istutusta	n.a.	
24 (n.a.-n.a.)	50 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1	n.a.	SSF	järviruoko	n.a.	
8,4 (n.a.-n.a.)	95 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	1	n.a.	SSF	järviruoko	n.a.	
24 (n.a.-n.a.)	40 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1	n.a.	SSF	järviruoko	n.a.	
8,4 (n.a.-n.a.)	55 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	1	n.a.	SSF	järviruoko	n.a.	
24 (n.a.-n.a.)	25 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1	n.a.	SSF	ei istutusta	n.a.	
8,4 (n.a.-n.a.)	5 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	1	n.a.	SSF	ei istutusta	n.a.	
18 (n.a.-n.a.)	30 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	2,4	n.a.	SSF	järviruoko	n.a.	
25,1 (n.a.-n.a.)	99 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	2,4	n.a.	SSF	järviruoko	n.a.	
18 (n.a.-n.a.)	0 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	2,4	n.a.	SSF	järviruoko	n.a.	
25,1 (n.a.-n.a.)	99 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	2,4	n.a.	SSF	järviruoko	n.a.	
24 (n.a.-n.a.)	20 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	2,4	n.a.	SSF	järviruoko	n.a.	
26 (n.a.-n.a.)	95 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	2,4	n.a.	SSF	järviruoko	n.a.	
24 (n.a.-n.a.)	50 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	2,4	n.a.	SSF	järviruoko	n.a.	
8,4 (n.a.-n.a.)	35 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	2,4	n.a.	SSF	järviruoko	n.a.	
24 (n.a.-n.a.)	25 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	2,4	n.a.	SSF	ei istutusta	n.a.	
8,4 (n.a.-n.a.)	0 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	2,4	n.a.	SSF	ei istutusta	n.a.	
4 (n.a.-n.a.)	99 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	12 320	n.a.	P+P+P+P	ei istutusta	n.a.	
9,9 (n.a.-n.a.)	40 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	1 699	n.a.	P+SF+SSF	leveäosmankäämi, tuhkapaju	n.a.	
17 (n.a.-n.a.)	90 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	803	n.a.	P+SF+SSF	leveäosmankäämi, tuhkapaju	n.a.	
n.a. (0,04-317)	48 (n.a.-n.a.)	n.a.	n.a.	n.a.	HSF	n.a.	ei	(Rabello ym. 2019)
n.a. (0,04-317)	45 (n.a.-n.a.)	n.a.	n.a.	n.a.	HSF	n.a.	sora	
n.a. (0,04-317)	68 (n.a.-n.a.)	n.a.	n.a.	n.a.	VSF	n.a.	sora	

n.a. (0,04-317)	55 (n.a.-n.a.)	n.a.	n.a.	n.a.	SF	n.a.	n.a.	
n.a. (0,04-317)	56 (n.a.-n.a.)	n.a.	n.a.	n.a.	HSSF	n.a.	sora	
n.a. (0,04-317)	29 (n.a.-n.a.)	n.a.	n.a.	n.a.	VSSF	n.a.	sora	
n.a. (0,04-317)	18 (n.a.-n.a.)	n.a.	n.a.	n.a.	SSF	n.a.	n.a.	
n.a. (0,04-317)	50 (n.a.-n.a.)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	
12,74 (n.a.-n.a.)	30 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1,8	84	HSSF	järviruoko	sora	(Hijosa-Valsero ym. 2011b)
0,31 (n.a.-n.a.)	99 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	1,8	84	HSSF	järviruoko	sora	
0,52 (n.a.-n.a.)	98 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	1,8	84	HSSF	järviruoko	sora	
19,49 (n.a.-n.a.)	20 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1,8	84	HSSF	järviruoko	sora	
1,72 (n.a.-n.a.)	92 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	1,8	84	HSSF	järviruoko	sora	
11,83 (n.a.-n.a.)	50 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1,8	84	HSSF	järviruoko	sora	
5,25 (n.a.-n.a.)	35 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	1,8	84	HSSF	järviruoko	sora	
15,36 (n.a.-n.a.)	25 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1,8	84	HSSF	järviruoko	sora	
7,96 (n.a.-n.a.)	2 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	1,8	84	HSSF	järviruoko	sora	
23,57 (4,2-64)	75 (-27-88,4)	n.a.	706	n.a.	HSSF	järviruoko	kivimurska	(Vymazal ym. 2016)
11,3 (1,9-45)	52 (2,5-77,9)	n.a.	2 100	n.a.	HSSF	järviruoko	sora	
11,54 (6,6-36)	49 (-17-89,2)	n.a.	300	n.a.	HSSF	ruokohelpi järviruoko,	sora	
17,84 (9,9-35)	46 (-25-83,8)	n.a.	1 150	n.a.	HSSF	ruokohelpi	sora	
53,1 (n.a.-n.a.)	n.a. (98-99)	22,1 (V)	2,95	84	HSSF	järviruoko	sora	(Ávila ym. 2010)
56,5 (n.a.-n.a.)	n.a. (98-99)	22,3 (V)	2,95	84	HSSF	järviruoko	sora	
1,5 (n.a.-n.a.)	n.a. (98-99)	21,4 (V)	2,95	84	HSSF	järviruoko	sora	

^a Puhdistustehokkuus ka <20%=harmaa, 20-40%=oranssi, 40-60%=sininen, 60-80%=keltainen, 80-100%=vihreä

^b V = veden lämpötila, I = ilman lämpötila

^c HSF = vaakasuuntainen maanpäällinen virtaus, HSSF = vaakasuuntainen maanalainen virtaus, P = lammikko

SF = maanpäällinen virtaus, VSSF = pystysuuntainen maanalainen virtaus

^d useamman kosteikkotyyppin yhdistelmät merkitty + -merkillä

^e laskettu Espanjan kesän ja talven keskiarvolämpötilat (Aurinkomatkat, 2020)

^f laskettu kosteikon sisäisten mittauspisteiden keskiarvot

Taulukko 2. Ketoprofeenin puhdistustehokkuuteen liittyvät tiedot tarkastelluista kosteikkotutkimuksista.

Tuleva pitoisuus ka (min-max) (µg/L)	Puhdistustehokkuus ka (min-max) (%) ^a	Lämpötila (°C) ^b	Kosteikon pinta-ala (m ²)	Syötetty vesimäärä (l/d)	Kosteikon tyyppi ^{c,d}	Kosteikon kasvillisuus	Kosteikon pohjamateriaali	Lähde
0,3 (0,02-2)	47 (47-91)	5,5–8,3 (V)	604	n.a.	HSSF	järviruoko	sora	(Chen ym. 2016)
0,35 (0,004-1,1)	63 (47-91)	16,2–18,9 (V)	504	n.a.	HSSF	järviruoko	sora	
0,3 (0,02-2)	72 (47-91)	5,5–8,3 (V)	2 645	n.a.	HSSF	ruokohelpi	sora	
0,35 (0,004-1,1)	90 (47-91)	16,2–18,9 (V)	2 645	n.a.	HSSF	ruokohelpi	sora	
0,3 (0,02-2)	83 (47-91)	5,5–8,3 (V)	983	n.a.	HSSF	järviruoko	sora	
0,35 (0,004-1,1)	78 (47-91)	16,2–18,9 (V)	983	n.a.	HSSF	järviruoko	sora	
n.a. (n.a.-n.a.)	0 (n.a.-n.a.)	21,9 (I)	750	n.a.	VF+SF	röyhyvihvilä, valkosalava, luonnonkasvit	muta	(Nuel ym. 2018)
n.a. (n.a.-n.a.)	n.a. (30-70)	15,0 (I)	750	n.a.	VF+SF	röyhyvihvilä, valkosalava, luonnonkasvit	muta	
n.a. (n.a.-n.a.)	n.a. (30-70)	-2,3 (I)	750	n.a.	VF+SF	röyhyvihvilä, valkosalava, luonnonkasvit	muta	
n.a. (n.a.-n.a.)	n.a. (30-70)	2,9 (I)	750	n.a.	VF+SF	röyhyvihvilä, valkosalava, luonnonkasvit	muta	
n.a. (n.a.-n.a.)	n.a. (70-90)	15,1 (I)	750	n.a.	VF+SF	röyhyvihvilä, valkosalava, luonnonkasvit	muta	
n.a. (n.a.-n.a.)	n.a. (70-90)	20,8 (I)	750	n.a.	VF+SF	röyhyvihvilä, valkosalava, luonnonkasvit	muta	

n.a. (n.a.-n.a.)	n.a. (70-90)	-0,5 (I)	750	n.a.	VF+SF	röyhyvihvilä, valkosalava, luonnonkasvit	muta	
2,9 (0,89-5,56) ^f	81 (77-81)	n.a.	1 702	20	P+SF+SSF	pikkulimaska, leveäosmankäämi, tuhkapaju	sora	(Hijosa-Valsero ym. 2010)
0,58 (0,53-0,71) ^f	77 (77-81)	n.a.	803	56	P+SF+SSF	leveäosmankäämi, tuhkapaju	n.a.	
1,8 (n.a.-n.a.)	40 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1	n.a.	SF	kapeaosmankäämi	n.a.	(Hijosa-Valsero ym. 2011a)
1,8 (n.a.-n.a.)	45 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1	n.a.	SF	kapeaosmankäämi	n.a.	
1,8 (n.a.-n.a.)	50 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1	n.a.	SSF	kapeaosmankäämi	n.a.	
1,8 (n.a.-n.a.)	45 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1	n.a.	SSF	ei istutusta	n.a.	
1,8 (n.a.-n.a.)	35 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1	n.a.	SF	järviruoko	n.a.	
1,8 (n.a.-n.a.)	20 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1	n.a.	SSF	järviruoko	n.a.	
1,8 (n.a.-n.a.)	10 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1	n.a.	SSF	ei istutusta	n.a.	
0,6 (n.a.-n.a.)	20 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	2,4	n.a.	SSF	järviruoko	n.a.	
0,5 (n.a.-n.a.)	0 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	2,4	n.a.	SSF	järviruoko	n.a.	
0,6 (n.a.-n.a.)	5 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	2,4	n.a.	SSF	järviruoko	n.a.	
0,5 (n.a.-n.a.)	35 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	2,4	n.a.	SSF	järviruoko	n.a.	
0,7 (n.a.-n.a.)	25 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	2,4	n.a.	SSF	järviruoko	n.a.	
0,5 (n.a.-n.a.)	0 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	2,4	n.a.	SSF	järviruoko	n.a.	
1,8 (n.a.-n.a.)	30 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	2,4	n.a.	SSF	järviruoko	n.a.	
1,8 (n.a.-n.a.)	15 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	2,4	n.a.	SSF	ei istutusta	n.a.	
4,6 (n.a.-n.a.)	80 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	1 699	n.a.	P+SF+SSF	leveäosmankäämi, tuhkapaju	n.a.	
1,1 (n.a.-n.a.)	75 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	803	n.a.	P+SF+SSF	leveäosmankäämi, tuhkapaju	n.a.	
n.a. (0,46-2,98)	16 (n.a.-n.a.)	n.a.	n.a.	n.a.	HSF	n.a.	ei	(Rabello ym. 2019)
n.a. (0,46-2,98)	9 (n.a.-n.a.)	n.a.	n.a.	n.a.	HSF	n.a.	sora	
n.a. (0,46-2,98)	37 (n.a.-n.a.)	n.a.	n.a.	n.a.	VSF	n.a.	sora	

n.a. (0,46-2,98)	67 (n.a.-n.a.)	n.a.	n.a.	n.a.	SF	n.a.	n.a.	
n.a. (0,46-2,98)	41 (n.a.-n.a.)	n.a.	n.a.	n.a.	HSSF	n.a.	sora	
n.a. (0,46-2,98)	-11 (n.a.-n.a.)	n.a.	n.a.	n.a.	VSSF	n.a.	sora	
n.a. (0,46-2,98)	10 (n.a.-n.a.)	n.a.	n.a.	n.a.	SSF	n.a.	n.a.	
n.a. (0,46-2,98)	27 (n.a.-n.a.)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	
0,46 (n.a.-n.a.)	19 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1,8	84	HSSF	järviruoko	sora	(Hijosa-Valsero ym. 2011b)
0,51 (n.a.-n.a.)	5 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1,8	84	HSSF	järviruoko	sora	
0,24 (n.a.-n.a.)	38 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	1,8	84	HSSF	järviruoko	sora	
0,5 (n.a.-n.a.)	23 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1,8	84	HSSF	järviruoko	sora	
1,21 (n.a.-n.a.)	30 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1,8	84	HSSF	järviruoko	sora	
1,39 (n.a.-n.a.)	19 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1,8	84	HSSF	järviruoko	sora	
1,15 (0,01-2,5)	91 (31,1-98,9)	n.a.	706	n.a.	HSSF	järviruoko	kivimurska	(Vymazal ym. 2016)
0,045 (0,01-6,5)	47 (-21-88,6)	n.a.	2 100	n.a.	HSSF	järviruoko	sora	
0,21 (0,031-0,37)	-31 (-141-67,4)	n.a.	300	n.a.	HSSF	ruokohelpi	sora	
0,4 (0,019-2,6)	18 (-58,1-56,2)	n.a.	1 150	n.a.	HSSF	järviruoko, ruokohelpi	sora	

^a Puhdistustehokkuus ka <20%=harmaa, 20-40%=oranssi, 40-60%=sininen, 60-80%=keltainen, 80-100%=vihreä

^b V = veden lämpötila, I = ilman lämpötila

^c HSF = vaakasuuntainen maanpäällinen virtaus, HSSF = vaakasuuntainen maanalainen virtaus, P = lammikko

SF = maanpäällinen virtaus, VSSF = pystysuuntainen maanalainen virtaus

^d useamman kosteikkotyyppin yhdistelmät merkitty + -merkillä

^e laskettu Espanjan kesän ja talven keskiarvolämpötilat (Aurinkomatkat, 2020)

^f laskettu kosteikon sisäisten mittauspisteiden keskiarvot

Taulukko 3. Diklofenaakin puhdistustehokkuuteen liittyvät tiedot tarkasteltavista kosteikkotutkimuksista.

Tuleva pitoisuus ka (min-max) (µg/L)	Puhdistustehokkuus ka (min-max) (%) ^a	Lämpötila (°C) ^b	Kosteikon pinta-ala (m ²)	Syötetty vesimäärä (l/d)	Kosteikon tyyppi ^{c,d}	Kosteikon kasvillisuus	Kosteikon pohjamateriaali	Lähde
1,5 (0,3-6)	49 (17-48)	5,5–8,3 (V)	504	n.a.	HSSF	järviruoko	sora	(Chen ym. 2016)
1,5 (0,2-5)	18 (17-48)	16,2-18,9 (V)	504	n.a.	HSSF	järviruoko	sora	
1,5 (0,3-6)	73 (52-73)	5,5–8,3 (V)	2 645	n.a.	HSSF	ruokohelpi	sora	
1,5 (0,2-5)	51 (52-73)	16,2-18,9 (V)	2 645	n.a.	HSSF	ruokohelpi	sora	
1,5 (0,3-6)	95 (n.a.-n.a.)	5,5–8,3 (V)	983	n.a.	HSSF	järviruoko	sora	
1,5 (0,2-5)	95 (n.a.-n.a.)	16,2-18,9 (V)	983	n.a.	HSSF	järviruoko	sora	
n.a. (n.a.-n.a.)	0 (n.a.-n.a.)	21,9 (I)	750	n.a.	VF+SF	röyhyvihvilä, valkosalava, luonnonkasvit	muta	(Nuel ym. 2018)
n.a. (n.a.-n.a.)	0 (n.a.-n.a.)	15,0 (I)	750	n.a.	VF+SF	röyhyvihvilä, valkosalava, luonnonkasvit	muta	
n.a. (n.a.-n.a.)	0 (n.a.-n.a.)	–2,3 (I)	750	n.a.	VF+SF	röyhyvihvilä, valkosalava, luonnonkasvit	muta	
n.a. (n.a.-n.a.)	0 (n.a.-n.a.)	2,9 (I)	750	n.a.	VF+SF	röyhyvihvilä, valkosalava, luonnonkasvit	muta	
n.a. (n.a.-n.a.)	0 (n.a.-n.a.)	15,1 (I)	750	n.a.	VF+SF	röyhyvihvilä, valkosalava, luonnonkasvit	muta	
0,44 (0,26-0,67) ^f	65 (65-87)	n.a.	12 320	3200	P+P+P+P	n.a.	n.a.	(Hijosa-Valsero ym. 2010)
1,28 (0,76-2,02) ^f	78 (65-87)	n.a.	1 702	20	P+SF+SSF	pikkulimaska, leveäosmankäämi, tuhkapaju	sora	
0,69 (0,41-1,32) ^f	87 (65-87)	n.a.	803	56	P+SF+SSF	leveäosmankäämi, tuhkapaju	n.a.	
0,8 (n.a.-n.a.)	25 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1	n.a.	SF	kapeaosmankäämi	n.a.	(Hijosa-Valsero ym. 2011a)
0,4 (n.a.-n.a.)	0 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	1	n.a.	SF	kapeaosmankäämi	n.a.	
0,8 (n.a.-n.a.)	25 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1	n.a.	SF	kapeaosmankäämi	n.a.	

0,4 (n.a.-n.a.)	0 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	1	n.a.	SF	kapeaosmankäämi	n.a.	
0,8 (n.a.-n.a.)	40 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1	n.a.	SSF	kapeaosmankäämi	n.a.	
0,4 (n.a.-n.a.)	0 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	1	n.a.	SSF	kapeaosmankäämi	n.a.	
0,8 (n.a.-n.a.)	25 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1	n.a.	SSF	ei istutusta	n.a.	
0,4 (n.a.-n.a.)	35 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	1	n.a.	SSF	ei istutusta	n.a.	
0,8 (n.a.-n.a.)	20 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1	n.a.	SF	järviruoko	n.a.	
0,4 (n.a.-n.a.)	50 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	1	n.a.	SF	järviruoko	n.a.	
0,8 (n.a.-n.a.)	15 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1	n.a.	SSF	järviruoko	n.a.	
0,4 (n.a.-n.a.)	35 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	1	n.a.	SSF	järviruoko	n.a.	
0,8 (n.a.-n.a.)	10 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1	n.a.	SSF	ei istutusta	n.a.	
0,4 (n.a.-n.a.)	0 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	1	n.a.	SSF	ei istutusta	n.a.	
0,6 (n.a.-n.a.)	0 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	2,4	n.a.	SSF	järviruoko	n.a.	
0,8 (n.a.-n.a.)	65 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	2,4	n.a.	SSF	järviruoko	n.a.	
0,6 (n.a.-n.a.)	0 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	2,4	n.a.	SSF	järviruoko	n.a.	
0,8 (n.a.-n.a.)	70 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	2,4	n.a.	SSF	järviruoko	n.a.	
0,8 (n.a.-n.a.)	20 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	2,4	n.a.	SSF	järviruoko	n.a.	
0,8 (n.a.-n.a.)	70 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	2,4	n.a.	SSF	järviruoko	n.a.	
0,8 (n.a.-n.a.)	10 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	2,4	n.a.	SSF	järviruoko	n.a.	
0,4 (n.a.-n.a.)	0 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	2,4	n.a.	SSF	järviruoko	n.a.	
0,8 (n.a.-n.a.)	0 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	2,4	n.a.	SSF	ei istutusta	n.a.	
0,4 (n.a.-n.a.)	0 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	2,4	n.a.	SSF	ei istutusta	n.a.	
0,7 (n.a.-n.a.)	65 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	12 320	n.a.	P+P+P+P	ei istutusta	n.a.	
2,7 (n.a.-n.a.)	80 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	1 699	n.a.	P+SF+SSF	leveäosmankäämi, tuhkapaju	n.a.	
1,7 (n.a.-n.a.)	85 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	803	n.a.	P+SF+SSF	leveäosmankäämi, tuhkapaju	n.a.	
n.a. (0,11-147)	-11 (n.a.-n.a.)	n.a.	n.a.	n.a.	HSF	n.a.	ei	(Rabello ym. 2019)
n.a. (0,11-147)	48 (n.a.-n.a.)	n.a.	n.a.	n.a.	HSF	n.a.	sora	
n.a. (0,11-147)	10 (n.a.-n.a.)	n.a.	n.a.	n.a.	VSF	n.a.	sora	

n.a. (0,11-147)	38 (n.a.-n.a.)	n.a.	n.a.	n.a.	SF	n.a.	n.a.	
n.a. (0,11-147)	27 (n.a.-n.a.)	n.a.	n.a.	n.a.	HSSF	n.a.	sora	
n.a. (0,11-147)	-2 (n.a.-n.a.)	n.a.	n.a.	n.a.	VSSF	n.a.	sora	
n.a. (0,11-147)	24 (n.a.-n.a.)	n.a.	n.a.	n.a.	SSF	n.a.	n.a.	
n.a. (0,11-147)	19 (n.a.-n.a.)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	
0,24 (n.a.-n.a.)	65 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	1,8	84	HSSF	järviruoko	sora	(Hijosa-Valsero ym. 2011b)
0,2 (n.a.-n.a.)	70 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	1,8	84	HSSF	järviruoko	sora	
0,59 (n.a.-n.a.)	22 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1,8	84	HSSF	järviruoko	sora	
0,23 (n.a.-n.a.)	70 (n.a.-n.a.)	26 ^e (I)	1,8	84	HSSF	järviruoko	sora	
0,63 (n.a.-n.a.)	10 (n.a.-n.a.)	13,7 ^e (I)	1,8	84	HSSF	järviruoko	sora	
0,76 (0,14-2,5)	12 (-105-52)	n.a.	706	n.a.	HSSF	järviruoko	kivimurska	(Vymazal ym. 2016)
2,59 (0,69-5,4)	67 (-17,6-85)	n.a.	2 100	n.a.	HSSF	järviruoko	sora	
0,14 (0,77-1,3)	29 (-36-87,7)	n.a.	300	n.a.	HSSF	järviruoko, ruokohelpi	sora	
3,37 (0,01-12)	58 (12-87,5)	n.a.	1 150	n.a.	HSSF	järviruoko, ruokohelpi	sora	
0,3 (n.a.-n.a.)	99 (n.a.-n.a.)	22,1 (V)	2,95	84	HSSF	järviruoko	sora	(Ávila ym. 2010)
0,2 (n.a.-n.a.)	99 (n.a.-n.a.)	22,3 (V)	2,95	84	HSSF	järviruoko	sora	
0,003 (n.a.-n.a.)	99 (n.a.-n.a.)	21,4 (V)	2,95	84	HSSF	järviruoko	sora	

^a Puhdistustehokkuus ka <20%=harmaa, 20-40%=oranssi, 40-60%=sininen, 60-80%=keltainen, 80-100%=vihreä

^b V = veden lämpötila, I = ilman lämpötila

^c HSF = vaakasuuntainen maanpäällinen virtaus, HSSF = vaakasuuntainen maanalainen virtaus, P = lammikko
SF = maanpäällinen virtaus, VSSF = pystysuuntainen maanalainen virtaus

^d useamman kosteikkotyypin yhdistelmät merkitty + -merkillä

^e laskettu Espanjan kesän ja talven keskiarvolämpötilat (Aurinkomatkat, 2020)

^f laskettu kosteikon sisäisten mittauspisteiden keskiarvot